



SEGURIDAD
SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC
COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Análisis de deslizamiento de laderas por sismo

**Subdirección de Riesgos Sísmicos
2019**

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México.
Tel: 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 1 de 40



2020
AÑO DE
LEONA VICARIO
BENEMÉRITA MADRE DE LA PATRIA





Índice

Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Introducción	3
Información geológica georreferenciada disponible	4
Análisis sísmico	12
Análisis de desplazamientos permanentes	12
Estabilidad dinámica del talud	13
Metodología Mora-Vahrson (Mora y Vahrson 1994)	14
Descripción de los factores de susceptibilidad	15
Factor pendiente	15
Factor litológico	16
Factor humedad del suelo	18
Descripción de los indicadores detonantes	20
Intensidad sísmica	20
Intensidad de precipitaciones	22
Índice de susceptibilidad a deslizamientos	24
Índice de susceptibilidad	28
Aplicaciones aisladas	31
Chiapas	31
Puebla	35
Conclusiones	39
Recomendaciones	39
Bibliografía consultada	39





Objetivo general

Determinar la susceptibilidad de deslizamientos debido al factor sismo en la República Mexicana.

Objetivos específicos

Elaborar un mapa de la República Mexicana que permita implementar la metodología Mora-Vahrson para determinar la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos por el factor sismo.

Introducción

A lo largo de la historia de México, diferentes fenómenos naturales han afectado a los asentamientos humanos, tal como es el caso de los sismos, los cuales desde tiempos prehispánicos, han sido vistos como fenómenos devastadores que; desafortunadamente, dicha percepción no es tan diferente actualmente, debido a que los sismos han ocurrido siempre y seguirán ocurriendo.

Debido a la historia sísmica de nuestro país desde la era instrumental, se tienen identificadas las principales zonas en donde ocurren los sismos, siendo los de subducción los de mayor magnitud y con mayor cantidad en los catálogos, que ocurren en la frontera de las placas Rivera y de Cocos con la placa de Norteamérica. Sin embargo, también ocurren otros sismos aunque menos numerosos y poco estudiados que se localizan lejos de los contactos entre las placas llamados intraplaca; que como su nombre lo dice, son originados dentro de una placa y generalmente a profundidades someras; en el caso de México en la placa de Norteamérica. La sismicidad intraplaca representa la deformación interna de la placa. La ocurrencia de estos eventos sísmicos es poco frecuente y generalmente sus magnitudes son pequeñas, lo que ha dificultado su estudio.

México es un país cuyo territorio está conformado en dos terceras partes por sistemas montañosos donde se conjugan factores geológicos, geomorfológicos, estructurales y climáticos que definen zonas geológicamente inestables. Existen sobre ellos desarrollos urbanos y rurales así como infraestructura civil, en donde podrían causar daños a bienes expuestos y a la población están íntimamente ligados a las condiciones geológicas y estructurales del relieve, a la influencia del clima y, en cierto grado, a la influencia antrópica, particularmente la deforestación y el drenaje. Esto significa que un gran número de habitantes y bienes expuestos en una situación de riesgo potencial ante la generación de deslizamientos y derrumbes de roca, flujos de lodos y detritos, así como otros procesos destructivos asociados a zonas montañosas. Así mismo, la estabilidad de una ladera puede ser seriamente afectada por la vibración causada por un sismo. En el caso de que los materiales del talud estén saturados, la vibración puede provocar un aumento en la presión de poro y entonces causar pérdida de resistencia o aún licuación del suelo. En suelos sensitivos, las fuerzas sísmicas pueden inducir deformaciones que igualmente reducirán la resistencia y podrían conducir a la falla, si los movimientos sísmicos son de suficiente magnitud y duración. Se ha observado que los sismos de moderada y gran magnitud pueden inducir deslizamientos de laderas que podrían ocasionar pérdidas por sismo en caminos y carreteras. Incluso, se ha documentado que un enorme deslizamiento puede ser disparado por un efecto combinado de cambio de presión de poro en el suelo debido a las lluvias y un sismo.

En general, aunque los desastres por deslizamientos en México se deben principalmente a fenómenos meteorológicos derivados de eventos de lluvias tales como huracanes, tormentas tropicales, los deslizamientos por sismos y los efectos combinados de sismos y lluvias representan





un porcentaje importante en la ocurrencia de deslizamientos de laderas (taludes naturales). Los deslizamientos constituyen la tercera causa de muerte relacionada con sismos después del colapso de edificios y los tsunamis. Según las estimaciones que realizó el USGS, entre 2004 y 2010 se produjeron en el mundo unas 47000 muertes a causa de derrumbes o avalanchas detonados por algún sismo.

Dentro de los análisis de deslizamiento por sismo, una manera para estimar el posible deslizamiento traslacional de taludes ante la ocurrencia de un sismo es el uso del parámetro de desplazamiento de Newmark (Newmark, 1965), que es una medida del desplazamiento permanente de una porción de un talud causado por un movimiento sísmico a lo largo de su superficie. Otro método, es el Mora-Vahrson, el cual define en términos de factores de susceptibilidad, la ocurrencia de un deslizamiento de laderas, y que es ampliamente utilizado en Latinoamérica por la sencillez en su aplicación a niveles regionales (Mora y Vahrson, 1993). Este método está basado en reglas empíricas cuyos resultados dependen de indicadores denominados morfodinámicos como la topografía del lugar, las condiciones litológicas, la humedad del suelo y la intensidad sísmica. Los indicadores anteriormente descritos se combinan considerando un peso ponderado que define el valor relativo de la amenaza por deslizamientos en términos cualitativos, aunque cabe aclarar que este método no tiene bases robustas que representen este fenómeno físico, y no proporciona información sobre la ocurrencia de dicho fenómeno.

Los sismos inducen movimientos de todo tipo en las laderas y taludes (dependiendo de las características de los materiales presentes, de su intensidad, magnitud y distancia del epicentro) generando desde “graneo” y desprendimientos de bloques, hasta el deslizamiento de grandes masas de suelo o rocas, como flujos de tierra y avalanchas de roca.

Por otro lado, los sismos pueden activar algunos deslizamientos que se encontraban en condiciones cercanas al equilibrio límite. En los materiales finos y sueltos (areno-limosos), se pueden presentar problemas de licuación, donde al encontrarse en estado saturado, experimentan esfuerzos cortantes anómalos y rápidos por causa del sismo aumentando las presiones intersticiales (por falta de drenaje) hasta los valores de la presión total existente, anulándose prácticamente la presión efectiva y haciendo que los granos dejen de estar en contacto, desapareciendo la resistencia al corte y comportándose el material como un líquido. Esto llega a dar lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa que se traducen en deslizamientos para el caso de laderas y taludes.

Por tanto, es importante evaluar en lo mayor posible, los efectos potenciales de los taludes naturales (laderas), siendo fundamental el conocimiento y el análisis de la geología de la República Mexicana para establecer un esquema muy general de los problemas geotécnicos que puedan afectar la estabilidad de laderas.

Información geológica georreferenciada disponible

Para el análisis se utilizó información pública y del estado del arte, tal como la geológica, humedad de suelo, precipitación anual (INEGI) con la cual se pudieron asignar las características dinámicas de los distintos tipos de litologías identificadas.





En las figuras se presentan los mapas de las características litológicas empleadas, obtenidas a partir de agrupar la información geológica disponible, tomando en cuenta similitudes geomecánicas y estructurales de los materiales.

En la Tabla 1 se observan datos promedio de propiedades mecánicas de suelo representativos de cada grupo litológico usados para los fines de este estudio (cohesión (c'), ángulo de fricción (ϕ') y peso volumétrico (γ')); los valores son compilados por diversos autores (Barton, 1974; Hoek y Bray, 1981; Suárez, 1998; Jibson et al., 2000; González et al., 2002) a fin de contar con una referencia general para asignar propiedades a los materiales; así como de estudios de mecánica de suelos disponibles en México.

Tabla 1. Valores promedio de propiedades geotécnicas propuestas para la estimación de deslizamiento traslacional de laderas en función del grupo litológico del país.

Clasificación	Grupo litológico	Tipo de suelo	γ' (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	Umbral (°)
Rocas ígneas	Rocas ígneas extrusivas	Básica, intermedia, ácida, volcanoclástica.	28	100	42	60
	Rocas ígneas intrusivas	Básica, intermedia, ácida, diabasa, pórfido andesítico, pórfido riolítico.	26	80	40	60
Rocas metamórficas	Rocas metamórficas no foliadas o masivas	Corneana, cuarcita, mármol, skarn, Serpentinita.	27	70	40	60
	Rocas metamórficas foliadas	Esquisto, esquisto-gneis, filita, gneis, pizarra	25	29	31	50
	Rocas metamórficas de falla	Cataclasita.	22	10	24	45
	Complejos metamórficos y rocas varias	Complejo metamórfico, complejo ofiolítico, metaintrusivo, metavolcánica.	27	29	31	50
Rocas sedimentarias	Sedimentarias detríticas de grano grueso	Conglomerado, conglomerado-brecha sedimentaria, brecha sedimentaria, volcanoclástica.	28	24	32	50
	Sedimentarias detríticas de grano grueso/medio	Arenisca, arenisca-conglomerado.	25	48	35	45
	Sedimentarias detríticas de grano medio/fino	Arenisca-limolita, limolita-arenisca, limolita-lutita, lutita-arenisca.	24	35	30	45
	Sedimentarias detríticas de grano fino	Lutita.	23	30	30	45
	Rocas sedimentarias órgano-químicas	Coquina, yeso, caliche.	22	17	34	40
	Rocas intercaladas	Caliza-arenisca, caliza-limolita, caliza-lutita, caliza-yeso.	24	50	25	40

Barton (1974), Hoek y Bray (1981); Jibson et al. (2000)

Se asignaron valores de cohesión (c'), del ángulo de fricción (ϕ') y del peso volumétrico (γ') representativos de cada grupo litológico (González et al., 2002; Hoek y Bray, 1981).

Se presentan los valores de cohesión, fricción, peso volumétrico asignados acorde a la tabla anterior; así como el mapa de topografía de la República Mexicana.



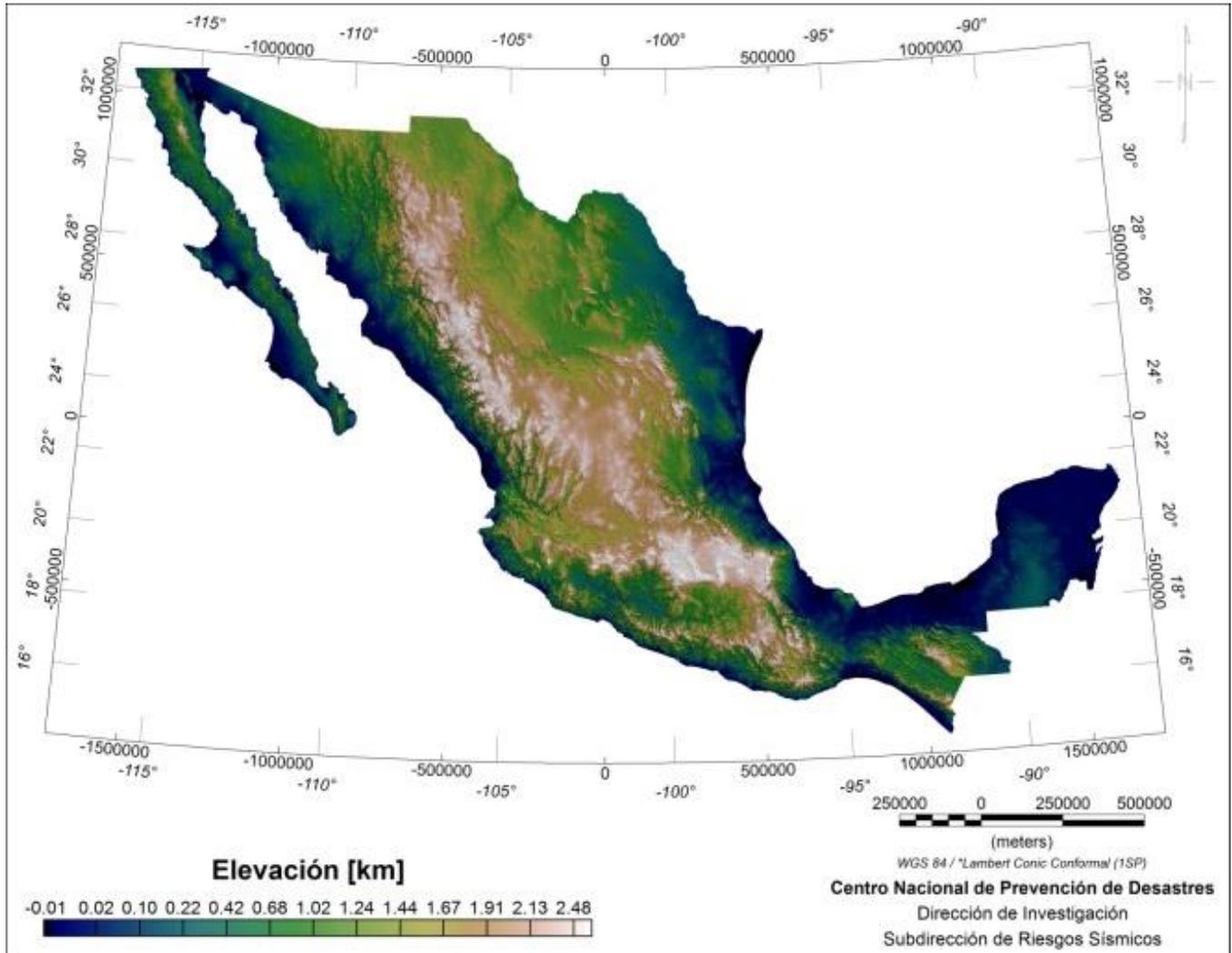


Figura 1. Modelo digital de elevación de la República Mexicana.



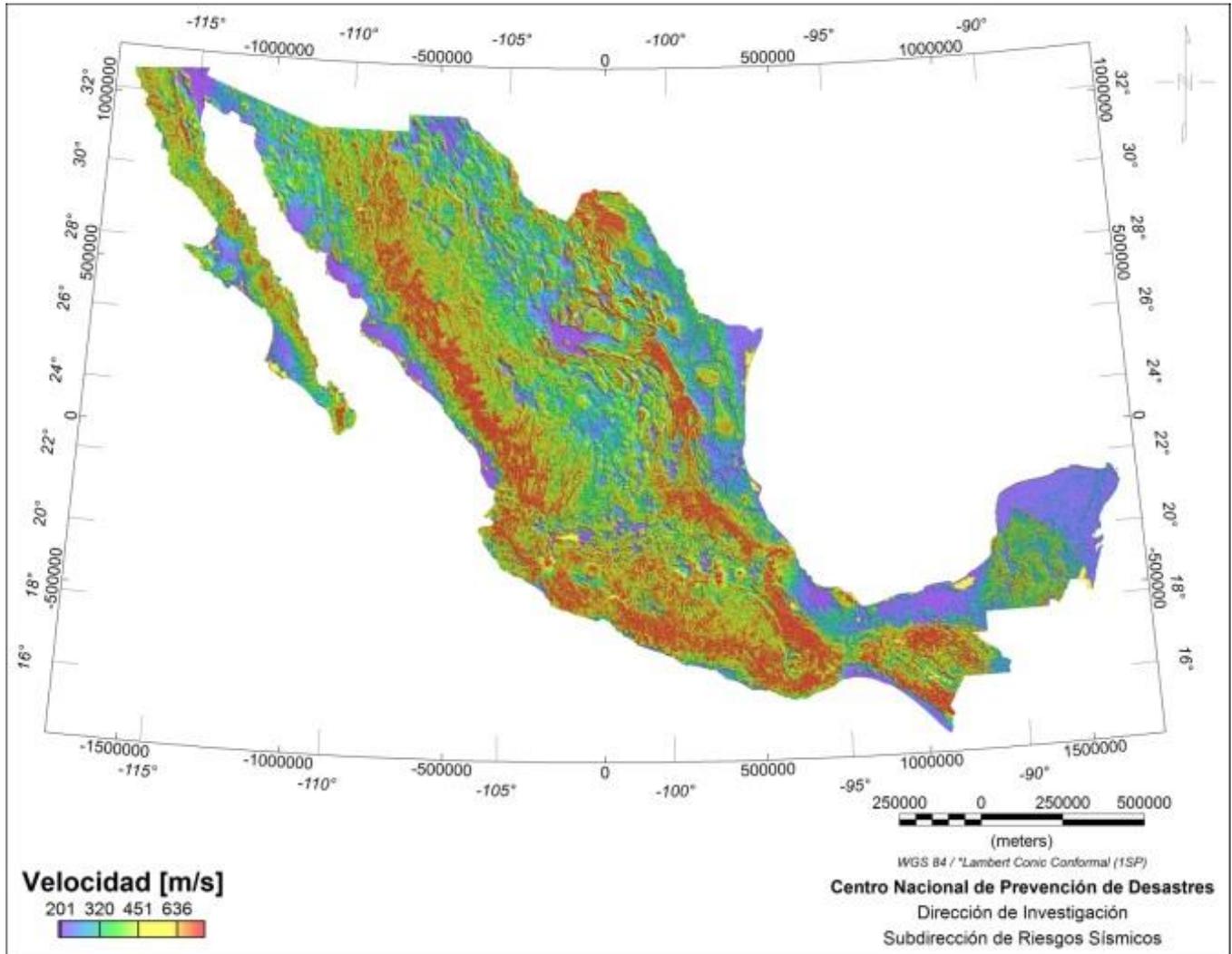


Figura. Mapa de Vs30 (USGS) de la República Mexicana.



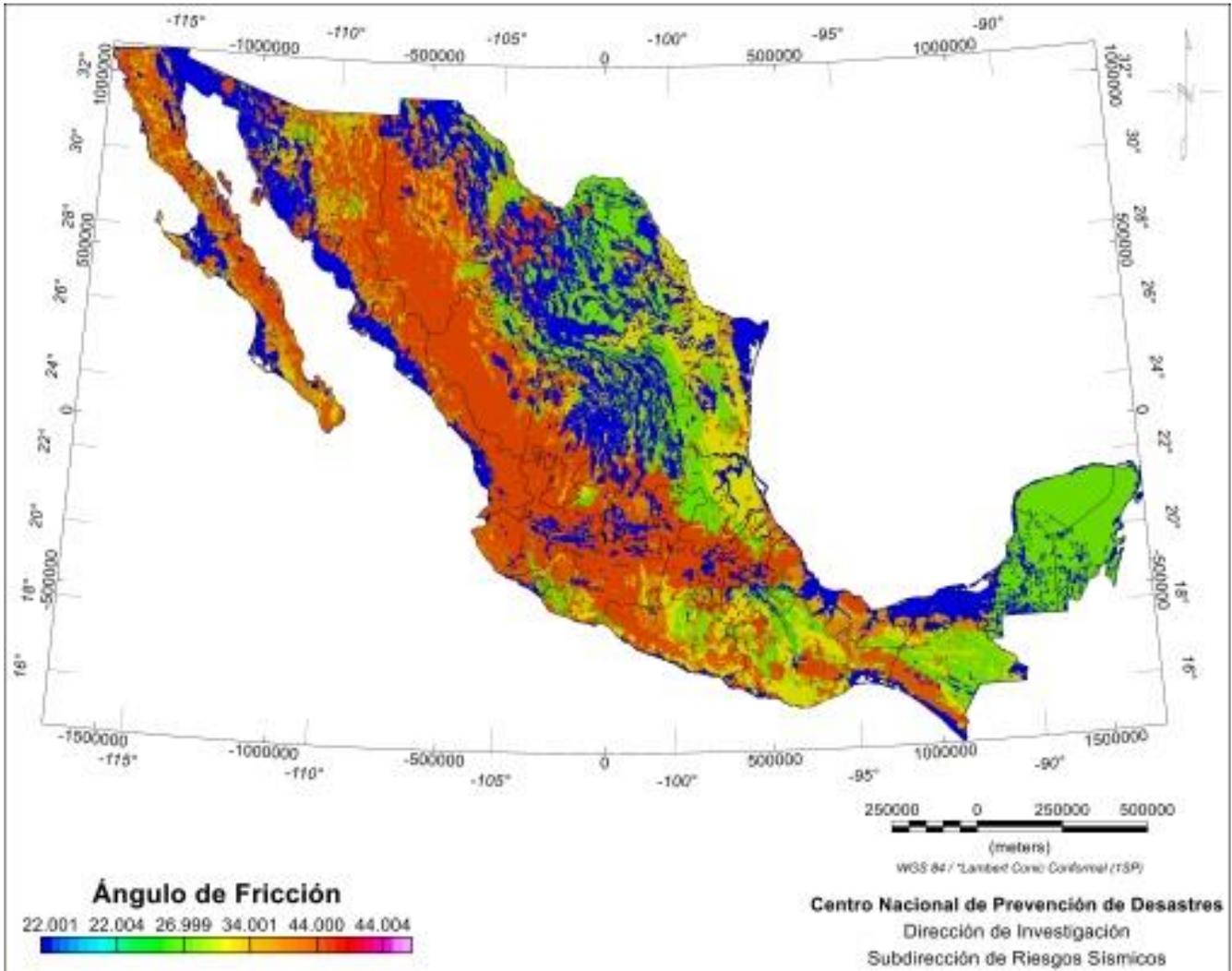


Figura 2. Mapa de ángulo de fricción de la República Mexicana.



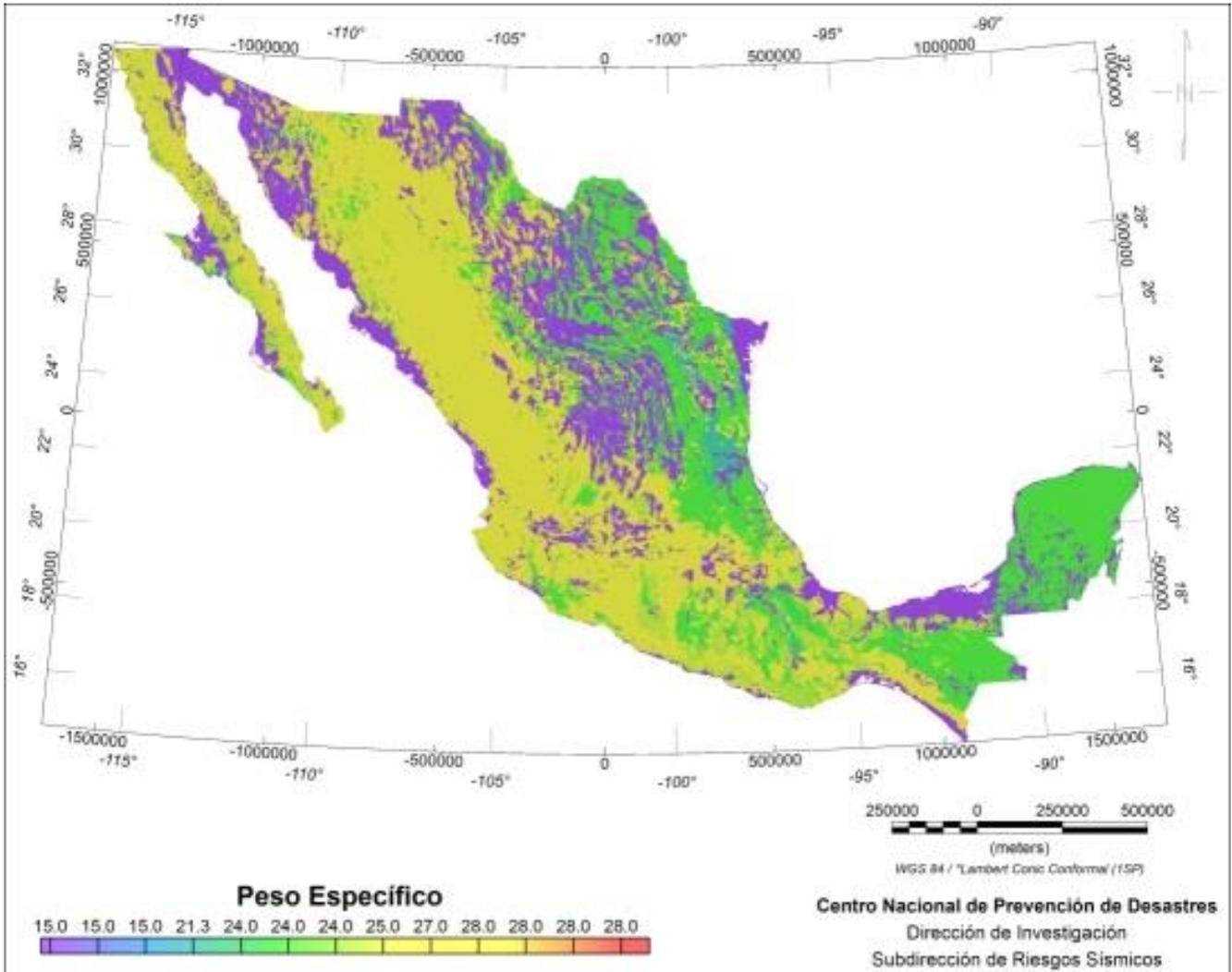


Figura 3. Mapa de peso específico de la República Mexicana.



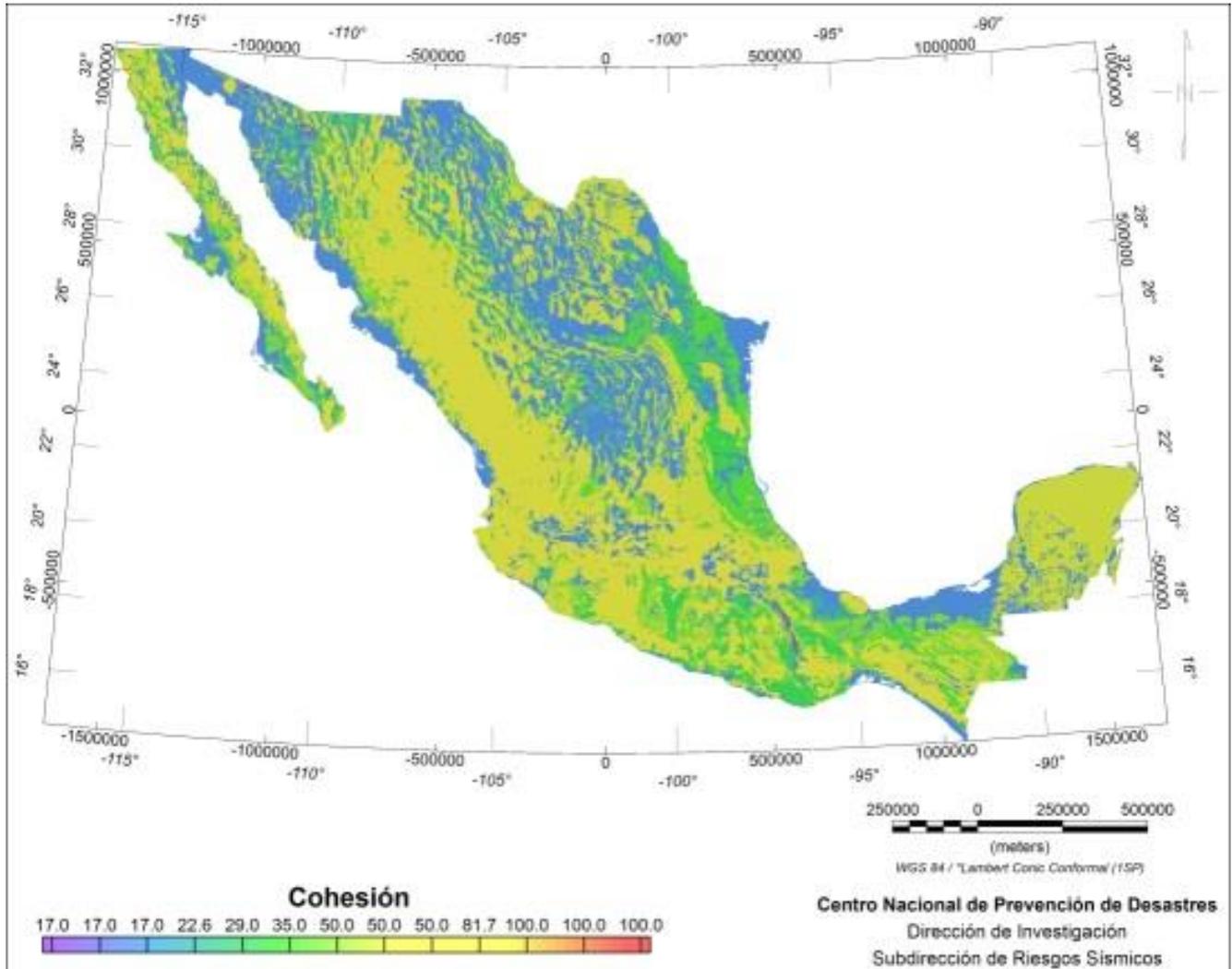


Figura 4. Mapa de cohesión de la República Mexicana.



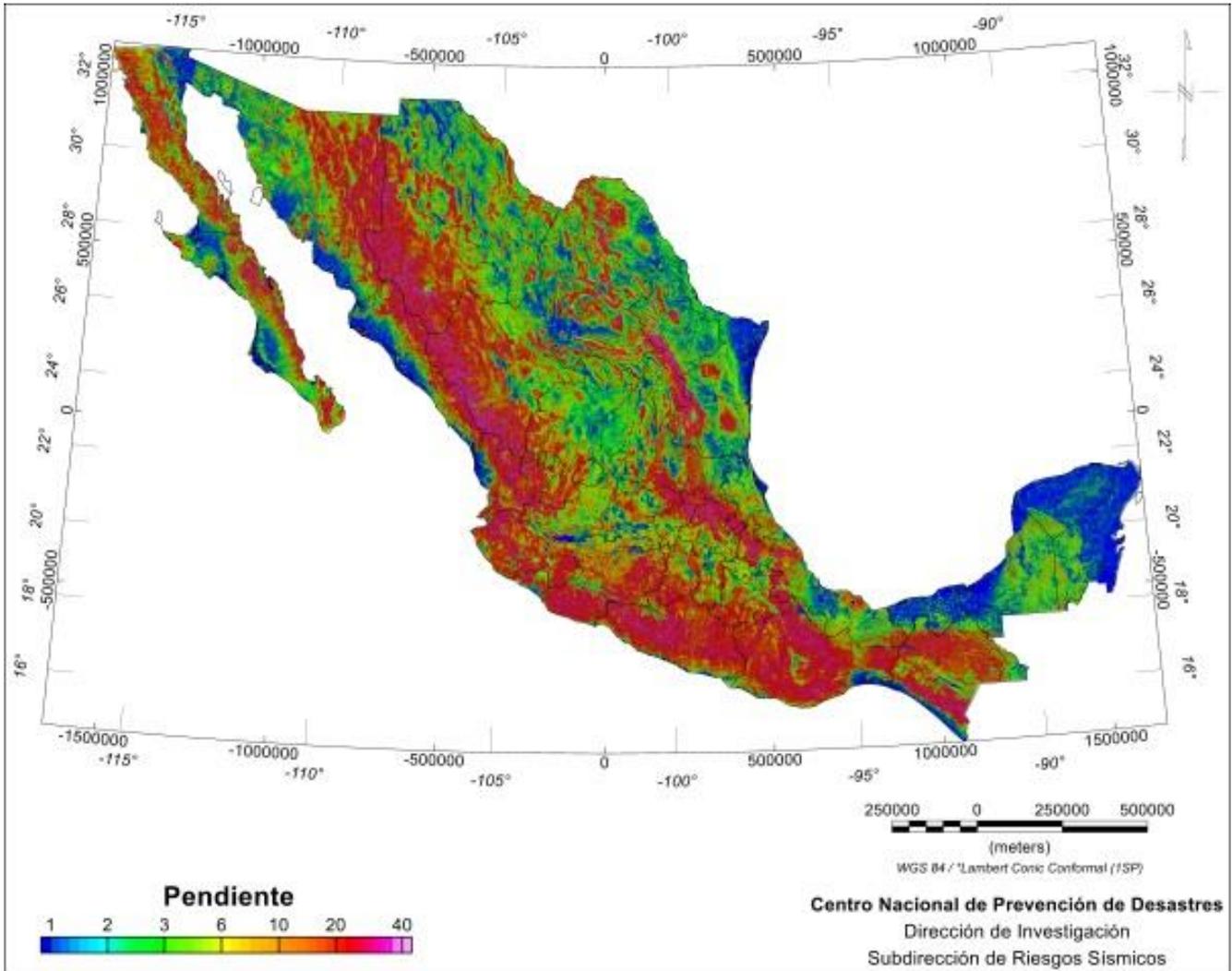


Figura 5. Mapa de pendientes de la República Mexicana.

Los valores de resistencia de los geomateriales, caracterizada generalmente por el ángulo de fricción y la cohesión, ya sea en estado seco o saturado, llegan a presentar mucha diferencia incluso dentro de una misma unidad litológica. Asignar valores representativos a los materiales generalmente conlleva una gran incertidumbre, sobre todo si se trata de modelar deslizamientos en áreas extensas. Los valores de resistencia, aun cuando sean derivados de sondeos, resultan difíciles de extrapolar para todo un grupo litológico extenso, dado que son puntuales y dependen del tipo y condiciones del ensayo, de características locales (grado de alteración, presencia de hidrotermalismo, grado de cementación, fracturamiento entre otros).

Es necesario considerar valores de resistencia promedio representativos de los materiales de la capa de suelo que se encuentra alterada (principalmente de las discontinuidades que representan las zonas de debilidad con la superficie de suelo en contacto con la parte sana del suelo y donde se asume que se presenta el deslizamiento traslacional) debido a la imposibilidad de contar con valores exactos para todas las formaciones rocosas, dadas las limitaciones en cuanto a información,





la variabilidad de las propiedades incluso dentro de un mismo afloramiento además de que la escala de trabajo es a nivel regional.

Análisis sísmico

Los movimientos de tierra del terremoto son capaces de inducir grandes fuerzas de inercia desestabilizadoras, de naturaleza cíclica, en laderas y terraplenes. Además, la resistencia al cizallamiento del suelo puede reducirse debido a las cargas transitorias (es decir, las tensiones cíclicas) o debido a la generación de presiones de agua porosas en exceso. El efecto combinado de las cargas sísmicas y los cambios en la resistencia al corte darán como resultado una disminución general en la estabilidad de la pendiente afectada.

Típicamente, las cargas cíclicas generarán un exceso de presión de poro en materiales sueltos y saturados sin cohesión (gravas, arenas y limos no plásticos), que pueden licuarse con una pérdida considerable de resistencia previa al terremoto. Sin embargo, los suelos cohesivos y los materiales secos sin cohesión generalmente no se ven afectados por las cargas cíclicas en la misma medida. Si el suelo cohesivo no es sensible, en la mayoría de los casos parece que al menos el 80 por ciento de la resistencia al corte estático se retendrá durante y después de la carga cíclica (Makdisi y Seed, 1978).

En general, se han propuesto cuatro métodos de análisis para evaluar la estabilidad de las pendientes durante los terremotos (Houston et al., 1987). En orden creciente de complejidad y gasto, estos son:

1. Método pseudoestático. Las fuerzas de inercia del terremoto se simulan mediante la inclusión de una fuerza estática horizontal y vertical en un análisis de equilibrio límite.
2. Método de desplazamiento de Newmark. Este método se basa en el concepto de que las aceleraciones de pendiente reales pueden exceder la aceleración del rendimiento estático a expensas de generar desplazamientos permanentes (Newmark, 1965).
3. Estabilidad posterior al terremoto. Esto se calcula utilizando resistencias no drenadas de laboratorio determinadas en muestras de suelo representativas que han sido sometidas a cargas cíclicas comparables al terremoto anticipado (por ejemplo, Castro et al., 1985).
4. Análisis dinámico de elementos finitos. Este es un análisis acoplado de dos (o tres) dimensiones utilizando un modelo de suelo constitutivo apropiado.

Newmark (1965) analizó pulsos de aceleración rectangulares para producir algunas generalizaciones gráficas que se podrían usar para estimar el desplazamiento como función de la relación existente entre ac y $amax$, posteriormente se emplearon métodos similares para refinar estas estimaciones usando una variedad de formas para pulsos de aceleración (triangular y senoidal) así como una gran colección de registros de movimientos fuertes de suelo (Sarma, 1975; Franklin y Chan, 1977; Yegian et al., 1991).

Análisis de desplazamientos permanentes

El análisis de desplazamientos sísmicos permanentes por el método de Newmark representa una extensión del método de análisis pseudoestático. Generalmente se requiere un análisis de estabilidad pseudoestático para calcular la aceleración de fluencia, factor fundamental del análisis.

El método de análisis de Newmark (1965) se basa en las siguientes hipótesis:

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México.
Tel: 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 12 de 40





1. La superficie de deslizamiento está bien definida en el terraplén.
2. El suelo exhibe una resistencia última bien definida que se considera rígido-plástica perfecta.
3. El terraplén no pierde una cantidad significativa de resistencia durante el sismo.

La magnitud de los desplazamientos permanentes inducidos sísmicamente, calculados por el análisis de Newmark, dependen principalmente de la aceleración de fluencia de la ladera, y la intensidad, duración y contenido de frecuencias de la historia de aceleraciones del terreno, ya que para el bloque rígido, las aceleraciones son iguales todo el tiempo a las aceleraciones del terreno (de la base). Las deficiencias de una respuesta de cuerpo rígido han provocado el uso de soluciones de respuesta elástica para la determinación de los coeficientes sísmicos de diseño (Koppula, 1984).

Sabemos que las presas de tierra y las laderas se comportan como cuerpos deformables bajo cargas sísmicas. En un instante cualquiera, diferentes puntos dentro de la masa potencial deslizante se aceleran con diferentes magnitudes, y posiblemente en sentidos opuestos. La naturaleza deformable del material se toma en cuenta al determinar una aceleración horizontal equivalente, calculada como el promedio de cada aceleración en la masa potencial deslizante para un instante dado (Bray et al., 1995).

Estabilidad dinámica del talud

La estabilidad dinámica de un talud se cuantifica por medio de la aceleración crítica (o permisible) a_c . Ésta es el umbral de aceleración del suelo necesaria para superar la resistencia de deslizamiento basal e iniciar un movimiento permanente del talud. La a_c está dada por:

$$a_c = (FS - 1) g \operatorname{sen} \alpha$$

donde a_c está en términos de la aceleración de la gravedad (g), α es la pendiente del terreno medida desde la horizontal de la superficie de deslizamiento y FS es el factor de seguridad estático definido como la relación de resistencia entre las fuerzas o momentos en un talud; este, a su vez, se define con base en las propiedades geotécnicas y topográficas del sitio en estudio como

$$FS = \frac{c'}{\gamma * t * \operatorname{sen}(\alpha)} + \frac{\tan(\phi')}{\tan(\alpha)} - \frac{m * \gamma_w * \tan(\phi')}{\gamma * \tan(\alpha)}$$

donde ϕ' es el ángulo de fricción efectivo, c' es la cohesión efectiva, γ es el peso específico del material, γ_w es el peso específico del agua, t es el espesor de material medido perpendicularmente al plano de falla, m es el factor de saturación del material y α es el ángulo del talud. Esta ecuación se divide en tres términos, el primero es la componente cohesiva de la resistencia, el segundo es la componente friccionante y el tercer término toma en cuenta la disminución de la resistencia debido a la presión de poro (Luzi et al., 2000). Sin embargo, un parámetro de suma importancia en la estabilidad del talud es el valor de α por lo que las propiedades mecánicas del suelo están ponderadas respecto a éste. Nótese que el valor de a_c , debe ser mayor que cero para ser un talud estable y que resista un nivel de intensidad sin fallar.



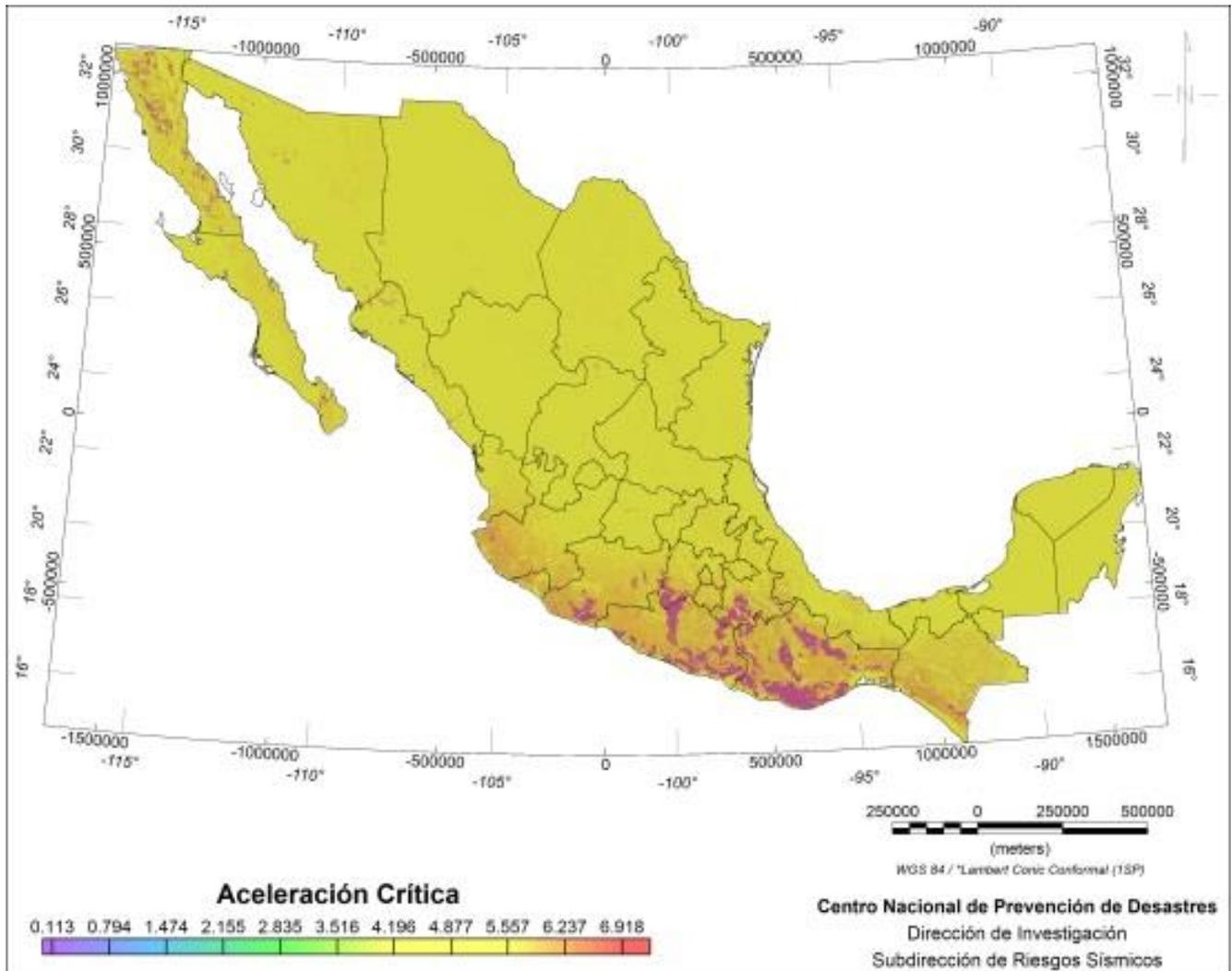


Figura 6. Mapa de aceleración crítica de la República Mexicana.

Metodología Mora-Vahrson (Mora y Vahrson 1994)

Esta metodología permite determinar, en un área específica, la susceptibilidad a deslizamientos por medio del análisis de cinco variables, las cuales se clasifican en factores de susceptibilidad y factores detonantes. Los factores de susceptibilidad reúnen las características geomorfológicas propias del sitio: pendiente, litología y humedad del suelo; mientras que los factores detonantes integran los agentes externos que propician la ocurrencia de un deslizamiento: sismicidad y lluvias intensas.

La metodología Mora-Vahrson (MV) es un procedimiento relativamente sencillo y bastante efectivo a la hora de zonificar regiones. Ha sido utilizada en países como Costa Rica, Guatemala, El Salvador y Nicaragua, con buenos resultados según se desprende de los estudios publicados.





La efectividad de la metodología ha sido confirmada por Barrantes et al. (2011) en un estudio realizado en la microcuenca del río Sarapiquí, en el que se corroboró la coincidencia entre las zonas identificadas como de alta susceptibilidad y los deslizamientos ocurridos el 6 de enero de 2008 a raíz del terremoto de Cinchona. Los resultados fueron suficientemente precisos, en las zonas identificadas como de muy alta y alta susceptibilidad ocurrieron deslizamientos de magnitud considerable.

Así mismo, los autores recomiendan que esta metodología se aplique a una escala no mayor que 1:50000, debido a la dificultad de conseguir información detallada de litología, altitud y meteorología.

Descripción de los factores de susceptibilidad

Factor pendiente

Se refiere al efecto que tiene la inclinación del terreno como agente pasivo en la susceptibilidad a deslizamientos, se supone que conforme se incrementa la pendiente, la probabilidad de que ocurra un deslizamiento aumenta también.

Originalmente la metodología Mora-Vahrson (1994) evalúa el factor pendiente utilizando un parámetro denominado relieve relativo (Rr), la cual se define como la máxima diferencia de elevación por kilómetro cuadrado.

$$R_r = (h_{max} - h_{min}) / [km]^2$$

Donde

R_r= Relieve relativo

H_{máx}= Elevación máxima

H_{mín}= Elevación mínima

Para determinar el factor pendiente (Sr), los autores Mora (2004b), SNET (2004), Barillas (2008) y Segura *et al.* (2011) entre otros, han asociado el relieve relativo (m/km²) a rangos de porcentaje de pendiente o grados de inclinación, tal y como se muestra en la Tabla 2. Esta modificación facilita la clasificación por categorías y lo expone de una forma más simple y clara.

Tabla 2. Valores de relieve relativo (Rr) expresados en términos de porcentaje de pendiente y grados de inclinación, para determinar el factor de pendiente (Sr).

Relieve relativo (m/Km ²)	Pendiente (%)	Inclinación (°)	Calificativo	Factor pendiente (Sr)
0 – 75	00,0 – 07,5	00,00 - 04,29	Muy bajo	0
76 – 175	07,6 – 17,5	04,30 - 09,93	Bajo	1
176 – 300	17,6 – 30,0	09,94 - 16,70	Moderado	2
301 – 500	30,1 – 50,0	16,71 - 26,57	Medio	3
501 – 800	50,1 – 80,0	26,58 - 38,66	Alto	4
800 <	80,0<	38,66<	Muy Alto	5



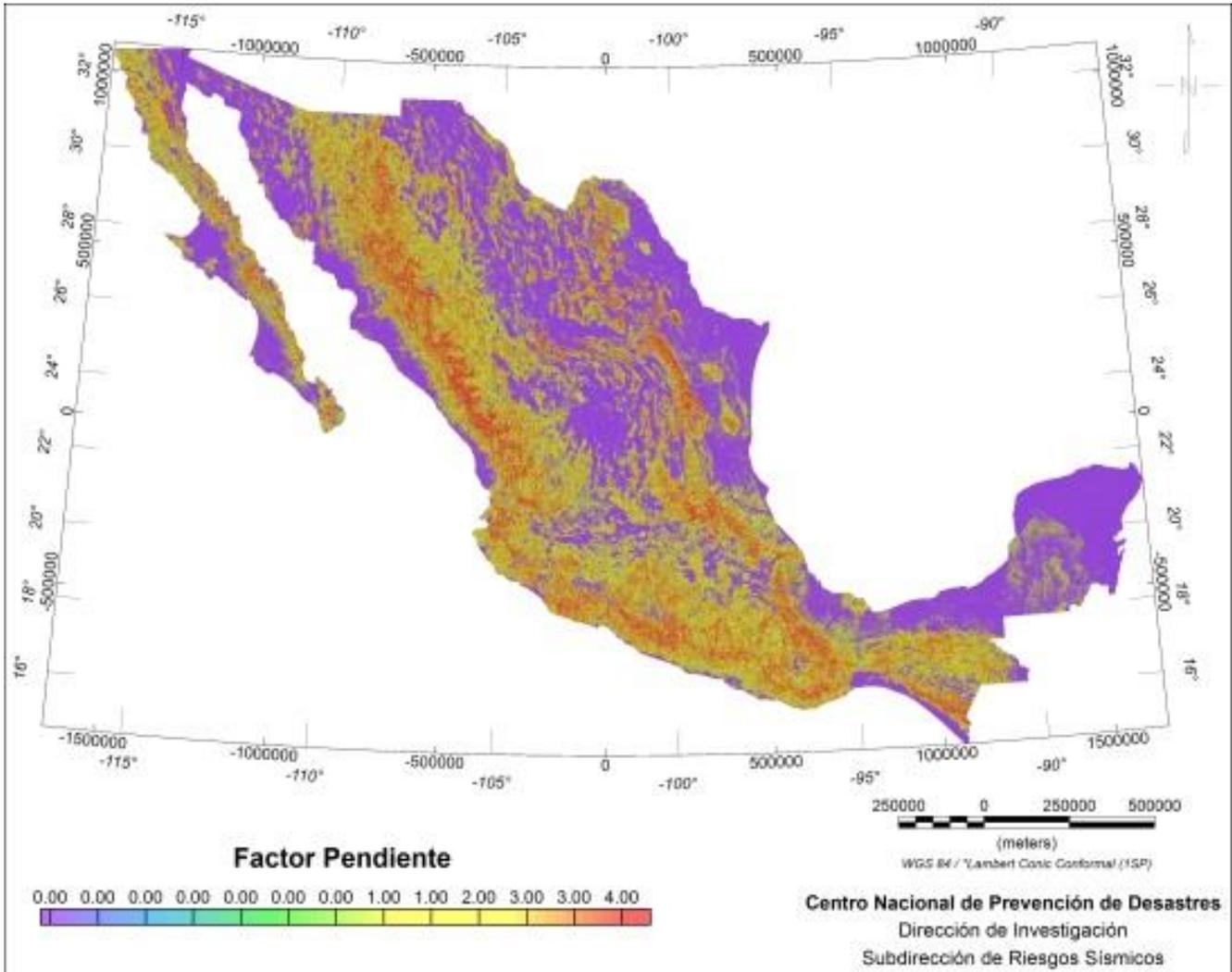


Figura 7. Susceptibilidad a deslizamientos por el factor de pendiente relativa de la República Mexicana.

Factor litológico

Este factor caracteriza la estructura de suelos y rocas, tomando en cuenta aspectos como composición, grado de alteración, resistencia, porosidad, permeabilidad. Permite relacionar la composición geológica con la incidencia de deslizamientos. Los valores se asignan de acuerdo a la información de la Tabla 3.





Tabla 3. Clasificación de diferentes litologías y su grado de susceptibilidad (Mora y Vahrson, 1991).

Litología	Características físico-mecánicas	Grado de susceptibilidad	Factor Litología (Si)
Aluviones: gruesos, permeables, compacto, con nivel freático bajo. Calizas: duras, permeable. Intrusivos: poco fisurados, bajo nivel freático. Basaltos, andesita, ignimbritas y similares: sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas: sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo	Sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas sin rellenos.	Bajo	1
Rocas sedimentarias: poco alteradas, estratificación maciza (decamétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas: medianamente fisuradas o alteradas, nivel freático a profundidades intermedias	Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables	Moderado	2
Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas: medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados: drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.	Resistencia al corte: moderada a media, fracturación importante	Medio	3
Aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.	Resistencia al corte: moderada a baja.	Alto	4





Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica: con estado de alteración avanzado, drenaje pobre, se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos muy elevados.

Resistencia al corte: muy baja, materiales blandos con muchos finos.

Muy alto

5

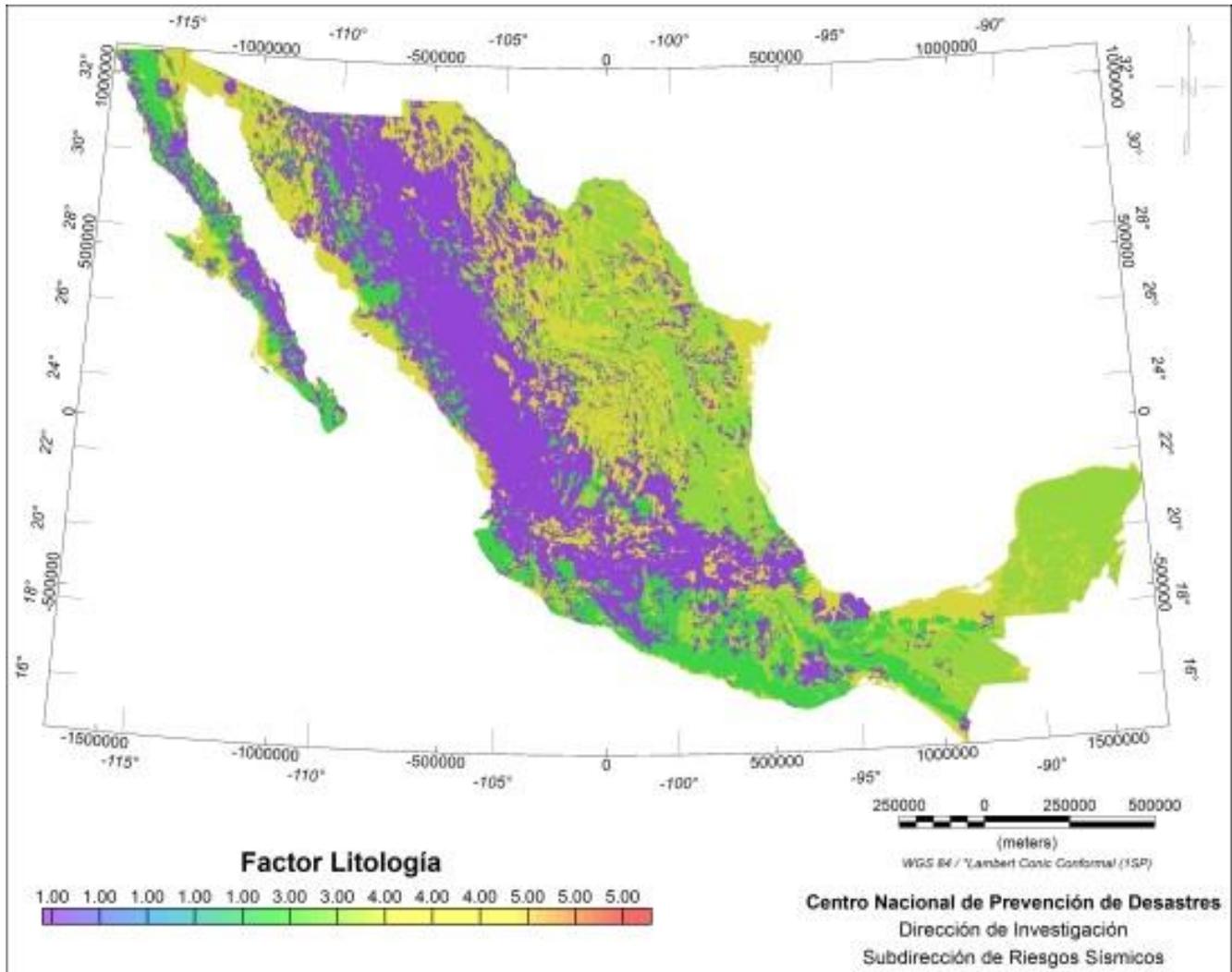


Figura 8. Factor de litología de la República Mexicana.

Factor humedad del suelo

Este factor cuantifica la influencia de la humedad acumulada en el suelo en la incidencia de deslizamientos de tierra. La manera deseable para determinar el contenido de humedad del suelo





es por medio de un muestreo en el sitio, seguido del cálculo de balance hídrico. Sin embargo no siempre se tendrá disponibilidad de tiempo y recursos para tomar los datos de campo, por lo que se puede estimar el contenido de humedad a partir de los datos de precipitación media mensual restando la evapotranspiración potencial (Mora y Vahrson 1994).

El valor de evapotranspiración potencial puede estimarse en 125 mm/mes, por lo tanto valores de precipitación mensual menores a 125 mm, no reflejan un aumento en la humedad del terreno; mientras que una precipitación entre 125 y 250 sí produce un incremento en la humedad que retiene el suelo (Mora y Vahrson 1994). Precipitaciones mayores a 250 mm mensuales conducen a una humedad del suelo muy alta, hasta niveles de saturación (Mora *et al.* 1992).

Tabla 4. Clasificación de los valores de precipitación promedio mensual (Mora y Vahrson, 1994).

Promedio mensual de precipitaciones (mm/mes)	Valor
< 125	0
125 – 250	1
250 <	2

De acuerdo con la información de la Tabla 4, se asigna un valor a cada mes del año; de tal forma que la sumatoria resultará en valores que oscilan entre 0 y 24 unidades. En la Tabla 5 se muestran los valores asociados a los distintos rangos de este índice.

Tabla 5. Factor humedad del suelo (S_h), resultante de la clasificación de los valores promedios de precipitación mensual acumulada, según la Tabla 4 (Mora y Vahrson, 1994).

Valor acumulado del índice de precipitación.	Clasificación	Factor S_h
0 – 4	Muy bajo	1
5 – 9	Bajo	2
10 – 14	Medio	3
15 – 19	Alto	4
20 – 24	Muy Alto	5



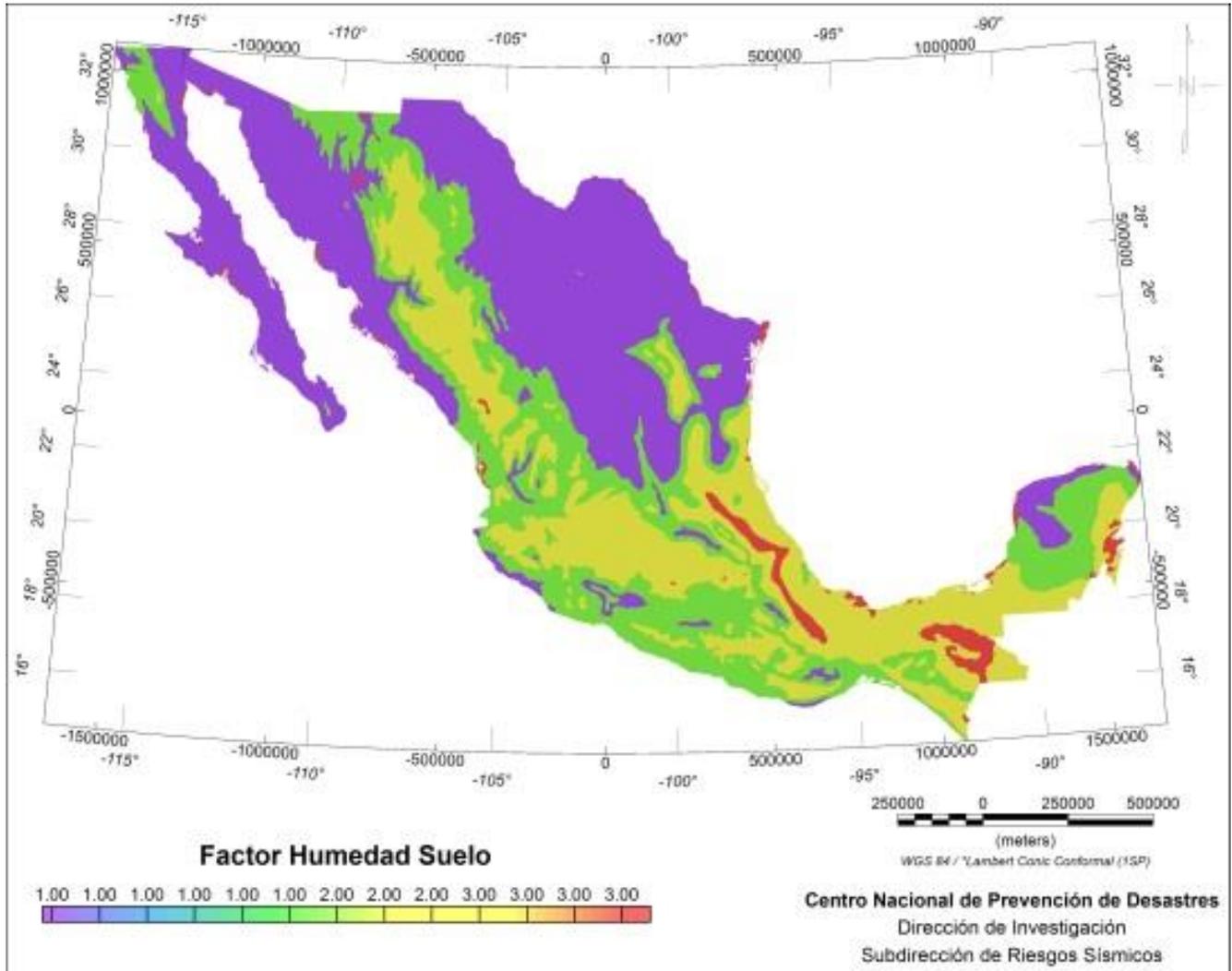


Figura 9. Factor de humedad del suelo de la República Mexicana.

Descripción de los indicadores detonantes

Intensidad sísmica:

Es un parámetro que cuantifica la influencia de la actividad sísmica en los deslizamientos de tierra. Mora y Vahrson (1994) exponen la sismicidad como un factor capaz de generar deslizamientos en proporción directa con su intensidad y lo relacionan con la escala Mercalli Modificada, según la Tabla 6.





Tabla 6. Determinación del factor de intensidad sísmica basado en el evento de 100 años en la escala Mercalli Modificada (Mora y Vahrson, 1994).

Intensidad MM	Aceleración PGA (% g)	Aceleración PGA (m/s ²)	Grado de susceptibilidad	Factor (Ds)
III	1 - 12	0,098 - 1,226	Leve	1
IV	13 - 20	1,227 - 2,011	Muy bajo	2
V	21 - 29	2,012 - 2,894	Bajo	3
VI	30 - 37	2,895 - 3,679	Moderado	4
VII	38 - 44	3,680 - 4,365	Medio	5
VIII	45 - 55	4,366 - 5,445	Elevado	6
IX	56 - 65	5,446 - 6,426	Fuerte	7
X	66 - 73	6,427 - 7,210	Bastante fuerte	8
XI	74 - 85	7,211 - 8,388	Muy fuerte	9
XII	>85	>8,389	Extremadamente fuerte	10



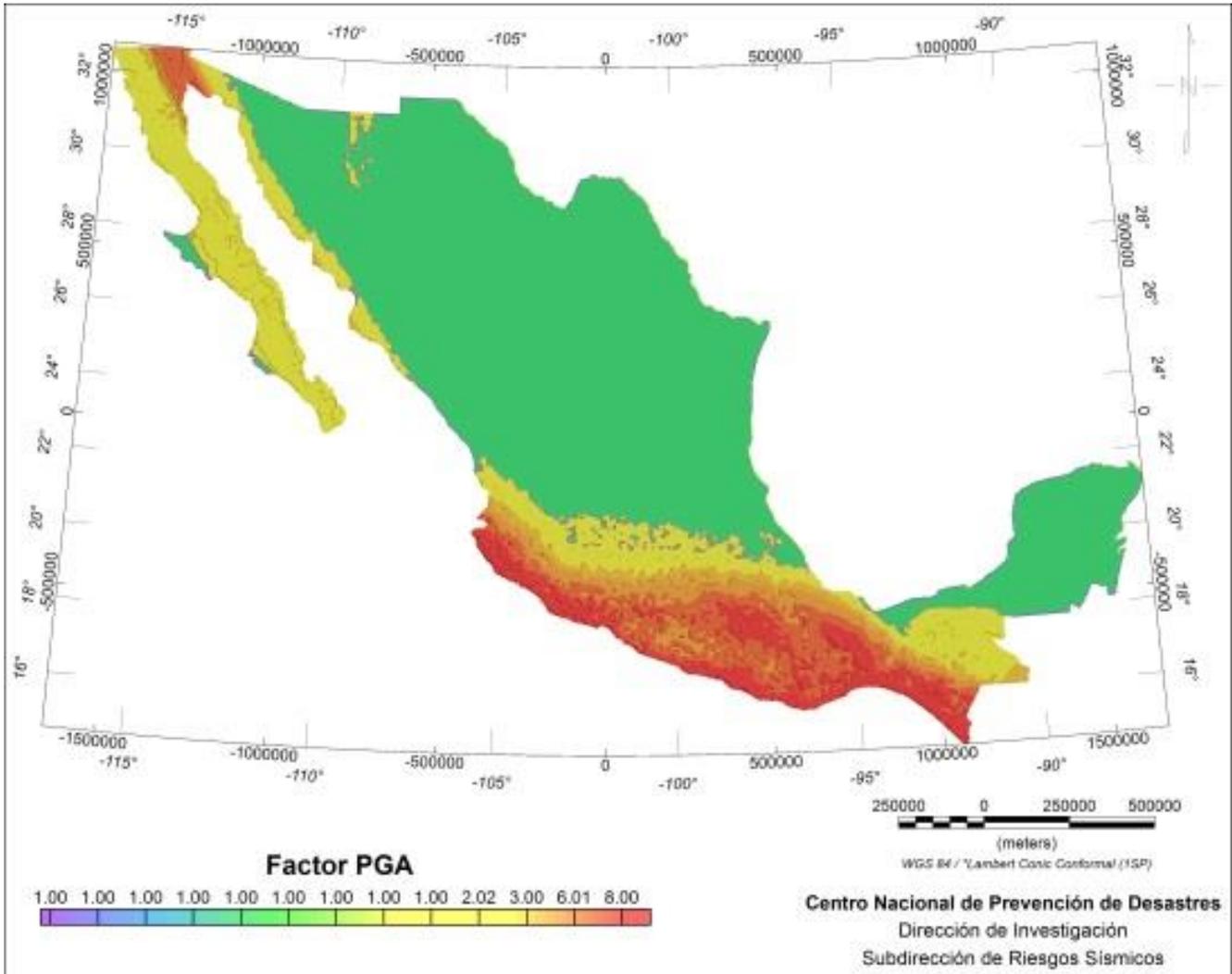


Figura 10. Factor de sismicidad (PGA) de la República Mexicana.

Intensidad de precipitaciones

Este factor considera la influencia de las lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos. Se considera la lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución de valores extremos Gumbel tipo I o Log Pearson Tipo III, con más de 10 años de registro (Mora et al.1992).





Tabla 7. Valoración del parámetro de disparo por lluvias T_p (Mora y Vahrson, 1994).

Lluvia máxima (mm) en 24 horas, período de retorno 100 años.	Clasificación	Factor (T_p)
< 100	Muy bajo	1
100 – 200	Bajo	2
200 – 300	Medio	3
300 – 400	Alto	4
>400	Muy Alto	5

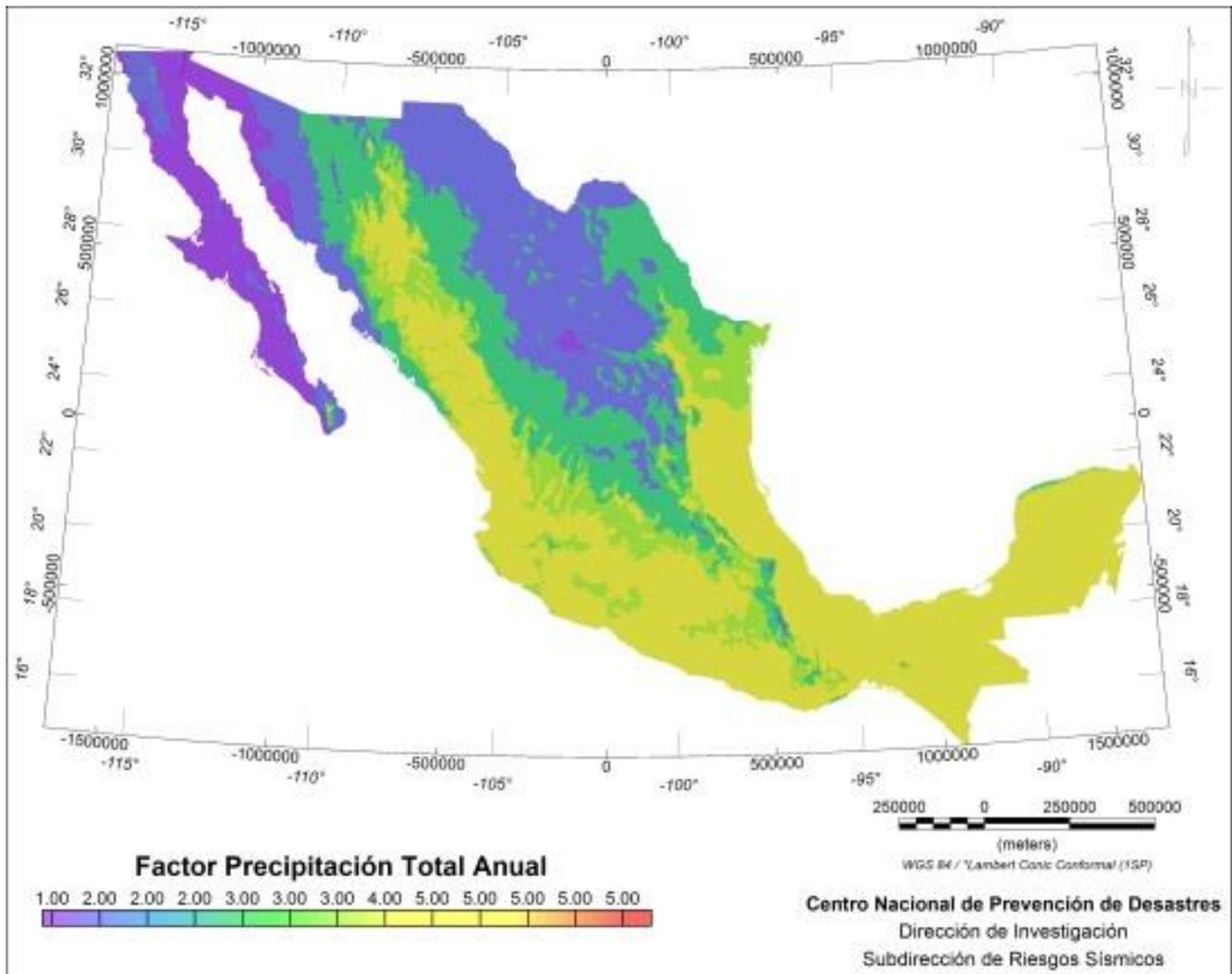


Figura 11. Factor de precipitación total anual de la República Mexicana.





Índice de susceptibilidad a deslizamientos

La susceptibilidad a deslizamientos es la condición que tiene un área a sufrir un deslizamiento como resultado de la interacción de los “factores de susceptibilidad” y los “factores detonantes”. La susceptibilidad se determinó en función de las condiciones geológicas, topográficas y de humedad del suelo (Mora y Vahrson 1994), mientras que los factores detonantes son la sismicidad y la ocurrencia de lluvias extremas de gran intensidad.

$$H = FS \times FD$$

Donde:

H = Grado de susceptibilidad a deslizamientos

FS = Susceptibilidad intrínseca del sitio

FD = Sumatoria de los factores detonantes

Tomando en cuenta que la “susceptibilidad del sitio” (FS) está determinada por la interacción multiplicativa de los factores pendiente, litología y humedad del suelo; y que el factor detonante (FD) corresponde a la adición de los agentes de sismicidad y lluvias, se puede desarrollar en la siguiente ecuación:

$$H = (S_r * S_l * S_h) * (T_s + T_p)$$

Donde:

H= Grado de susceptibilidad a deslizamientos

S_r= Factor pendiente o relieve relativo

S_l= Factor litológico

S_h= Factor de humedad del suelo

T_s= Sismicidad

T_p= Intensidad de precipitaciones



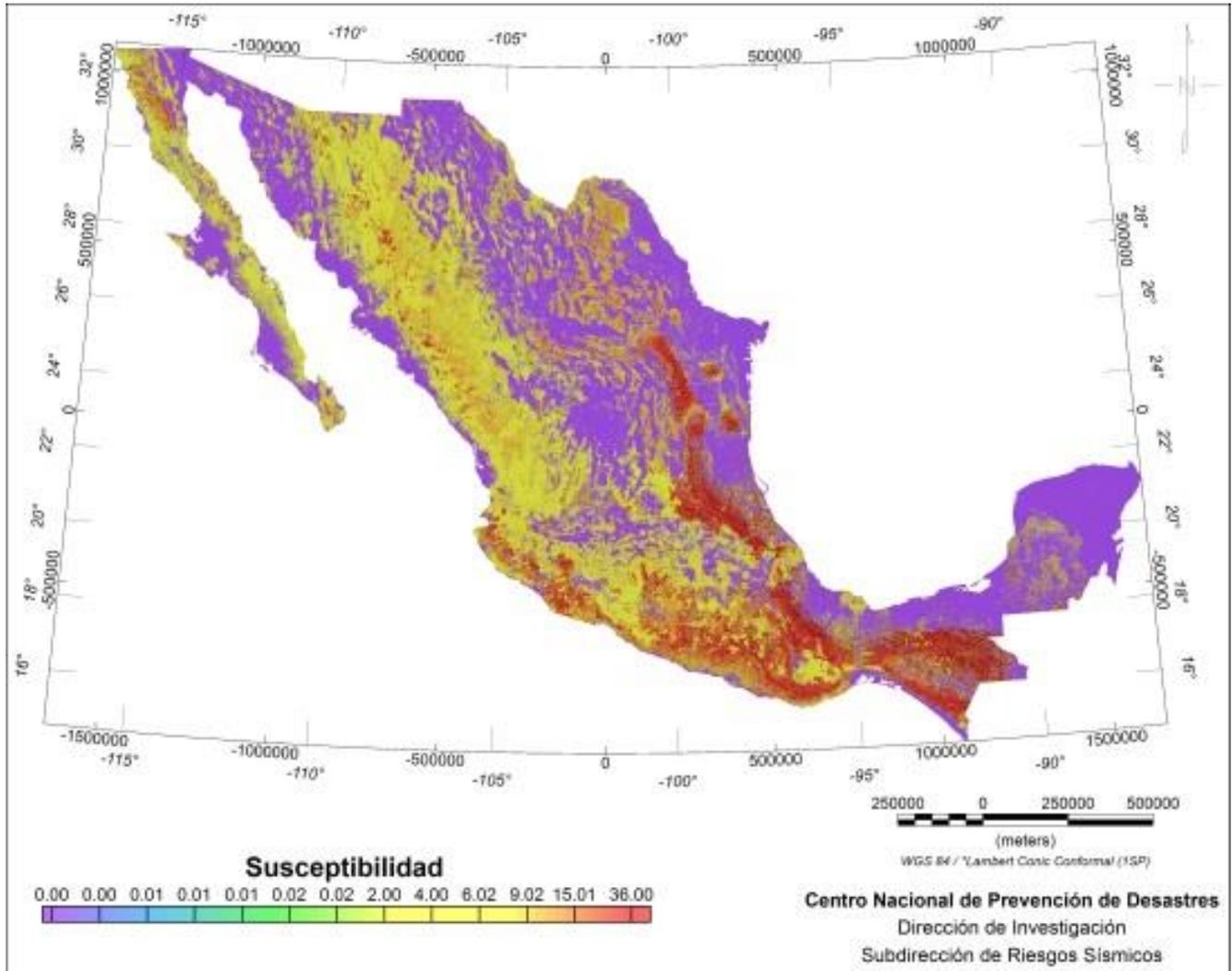


Figura 12. Factor de susceptibilidad intrínseca de la República Mexicana.



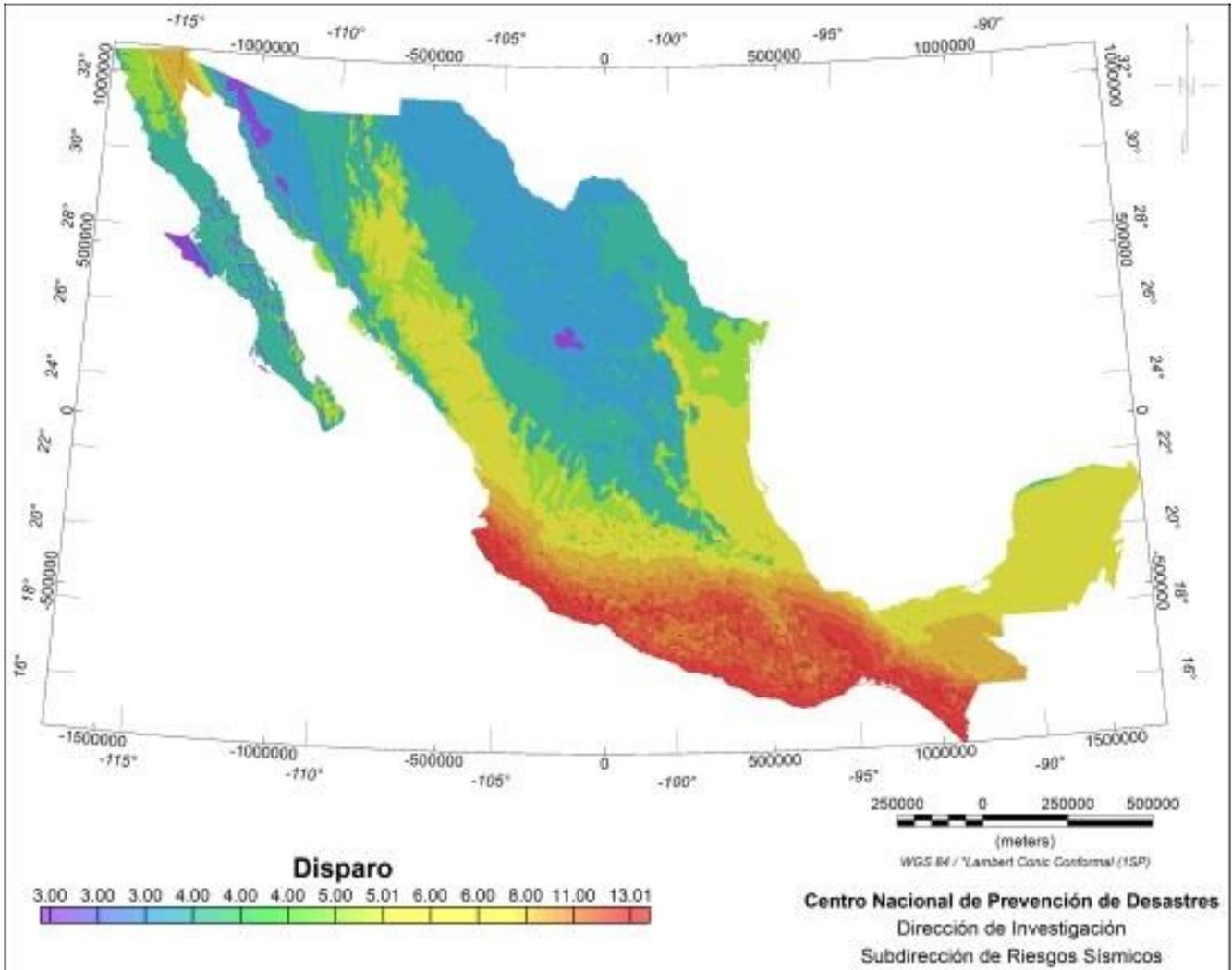


Figura 13. Sumatoria de los factores detonantes.

A partir de la ecuación de grado de susceptibilidad a deslizamientos se puede descomponer la susceptibilidad a deslizamientos como la sumatoria de la susceptibilidad a deslizamientos provocados por sismos (H_s) y los provocados por lluvias intensas (H_p).

$$H = (S_r * S_l * S_h * T_s) + (S_r * S_l * S_h * T_p)$$

$$H = H_s + H_p$$

H= Grado de susceptibilidad a deslizamientos

H_s = Susceptibilidad a deslizamientos propiciada por sismos

H_p = Susceptibilidad a deslizamientos propiciada por lluvias intensas



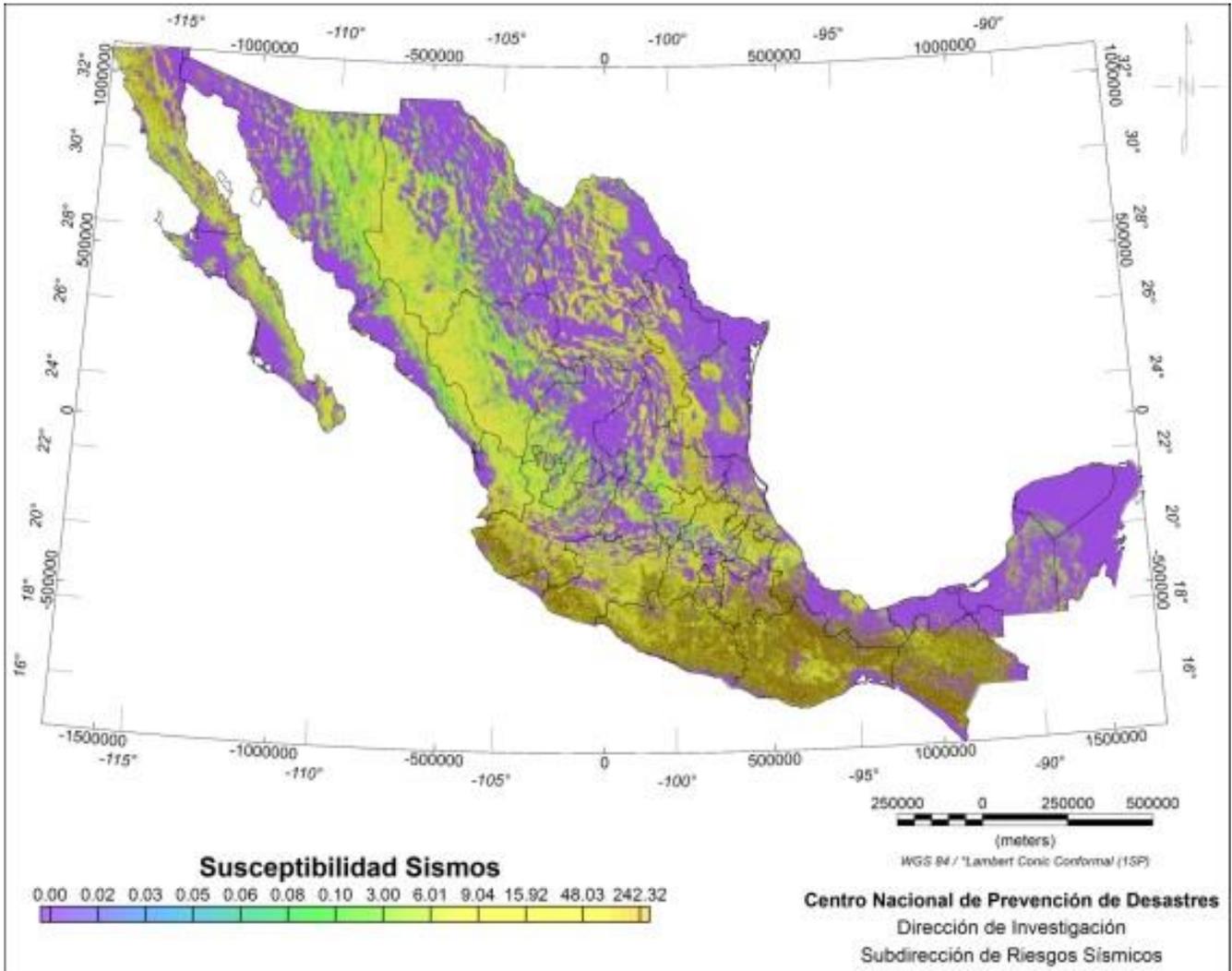


Figura 14. Susceptibilidad a deslizamientos propiciada por sismos



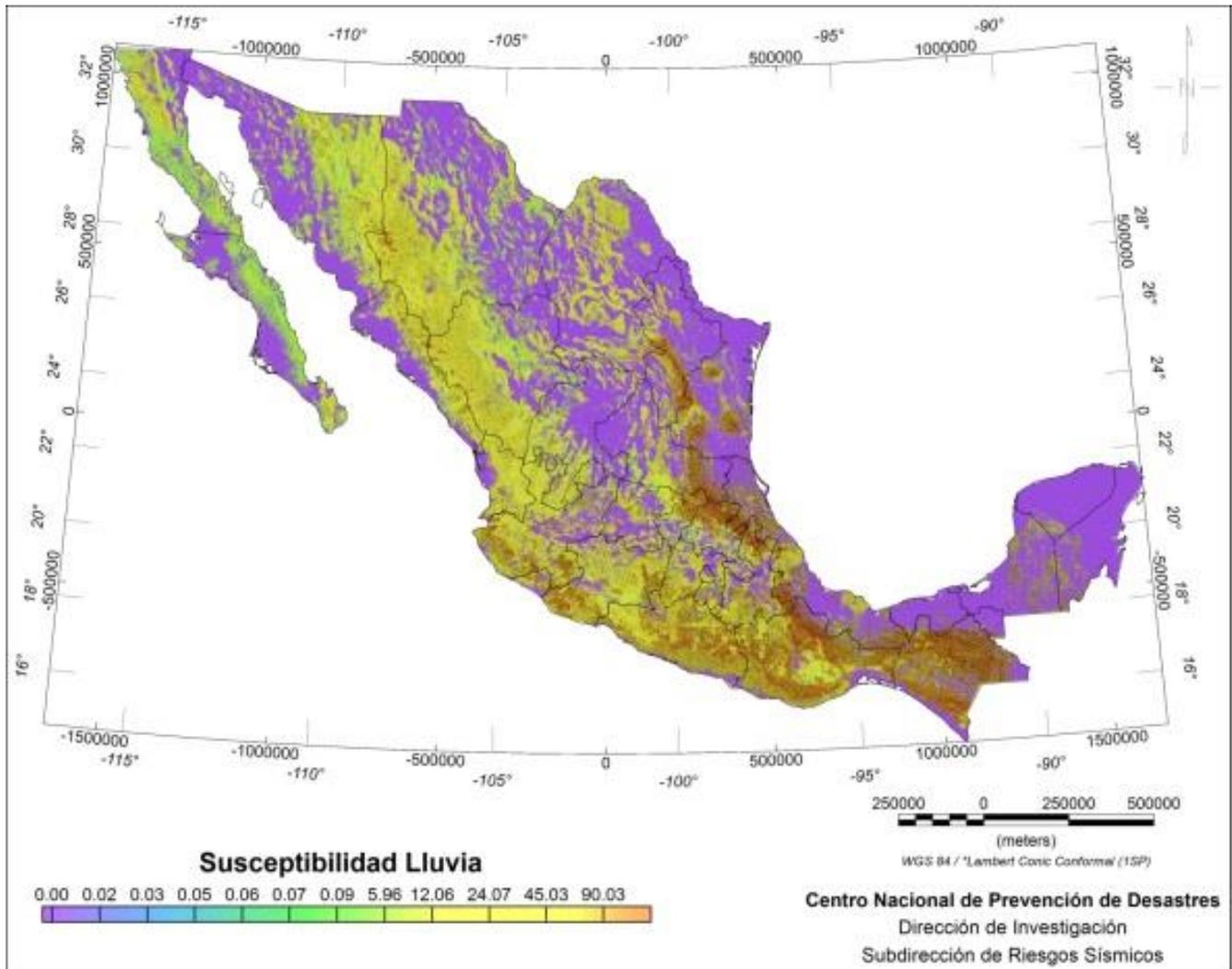


Figura 15. Susceptibilidad a deslizamientos propiciada por lluvias intensas

Índice de susceptibilidad

El método Mora-Vahrson originalmente propone que a partir de la interacción y ponderación de los factores descritos anteriormente, se realice el cálculo del índice de susceptibilidad. El valor resultante se interpreta según la Tabla 8 (Mora y Vahrson, 1994).





Tabla 8. Clasificación del índice de susceptibilidad a deslizamiento.

Índice de susceptibilidad a deslizamientos	Clasificación	Potencial de deslizamiento
0 – 6	I	Muy bajo
7 – 32	II	Bajo
33 – 162	III	Moderado
163 – 512	IV	Mediano
513 – 1250	V	Alto
>1250	VI	Muy alto

Basado en los trabajos de Mora *et al.* (2002); Mora (2004); Barrantes *et al.* (2011); en los que, para interpretar el resultado del índice de susceptibilidad, se recomienda no establecer una escala de valores única; sino que se sugiere dividir el rango de valores obtenidos en cinco clases de susceptibilidad, a partir del histograma de distribución de frecuencia. Para efectos del análisis e interpretación de resultados, en este estudio se utilizará la escala que se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación y caracterización de la susceptibilidad al deslizamiento (Mora, 2004).

Clasificación	Potencial de deslizamiento	Característica
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.





IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

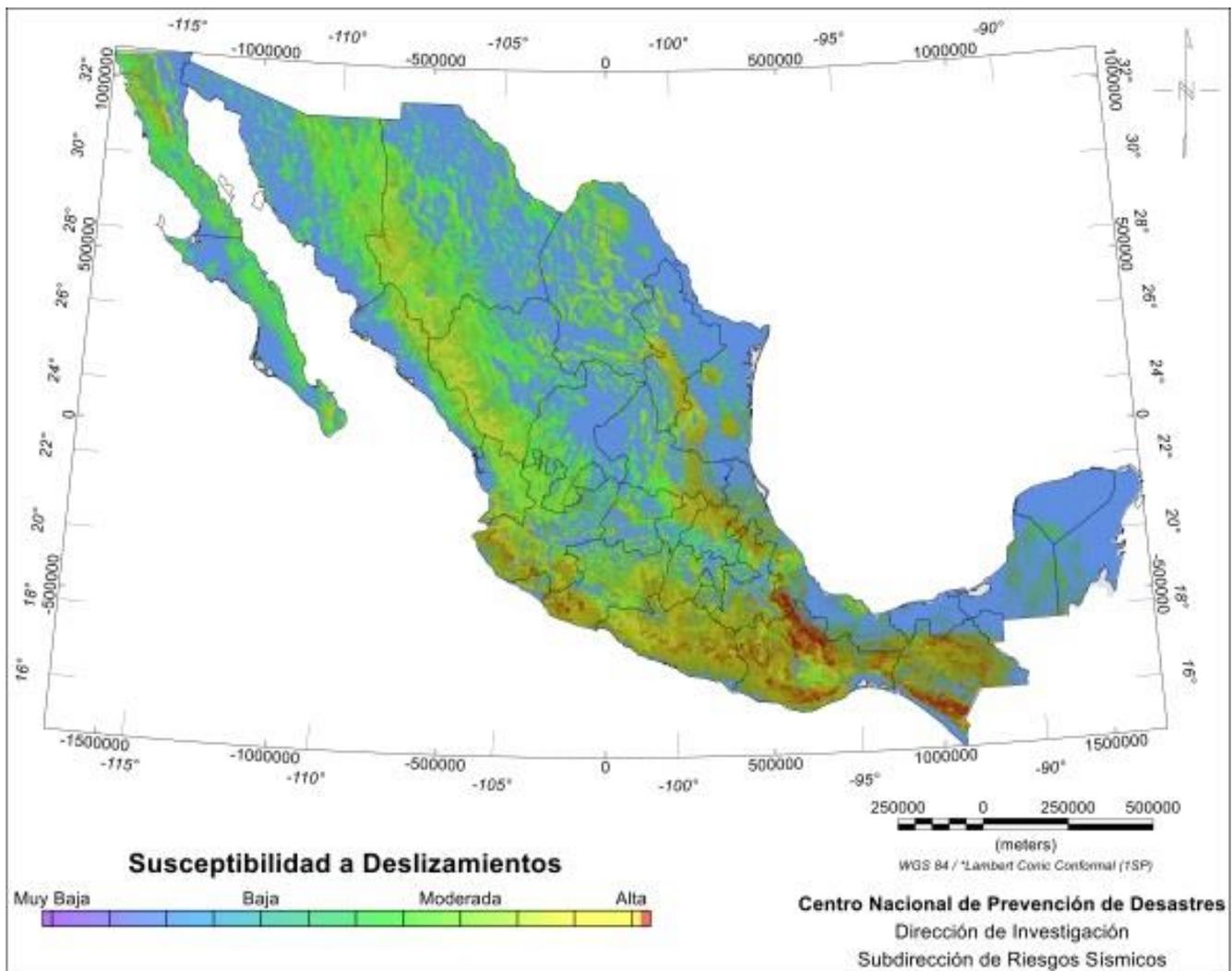


Figura 16. Método Mora – Vahrson de la República Mexicana.





Aplicaciones aisladas

Se realizaron mapas de los estados de Puebla y Chiapas para analizar más a detalle los dos métodos realizados en este proyecto, como el Mora-Vahrson y de aceleración crítica.

Chiapas

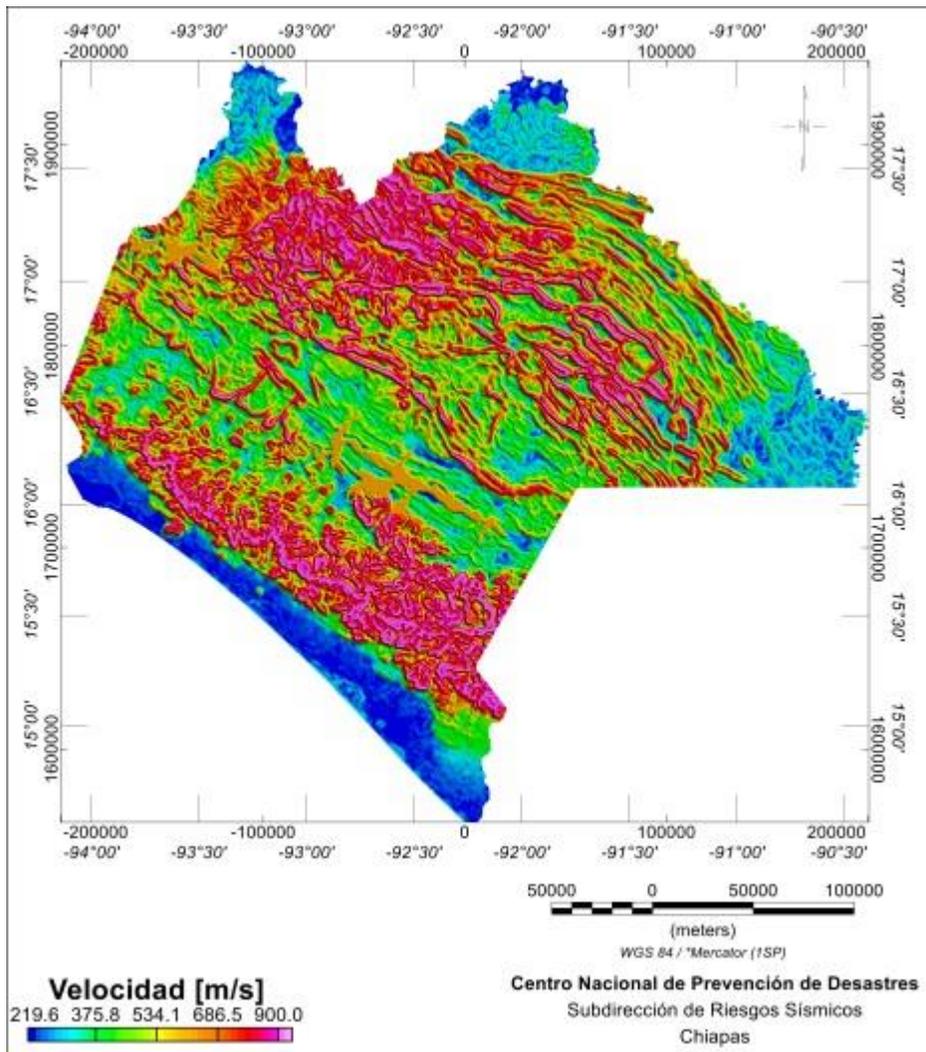


Figura 17. Mapa de Vs30 (USGS) del estado de Chiapas.



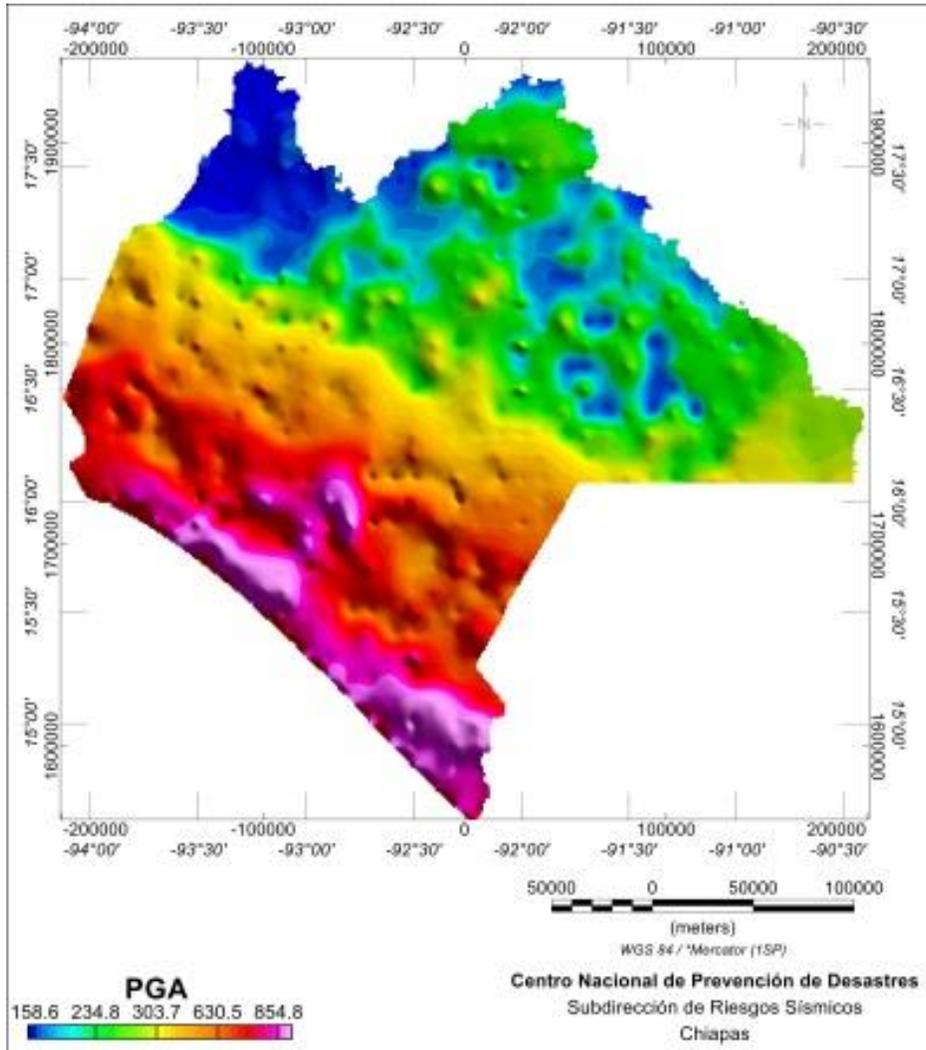


Figura 18. Mapa de PGA del estado de Chiapas.



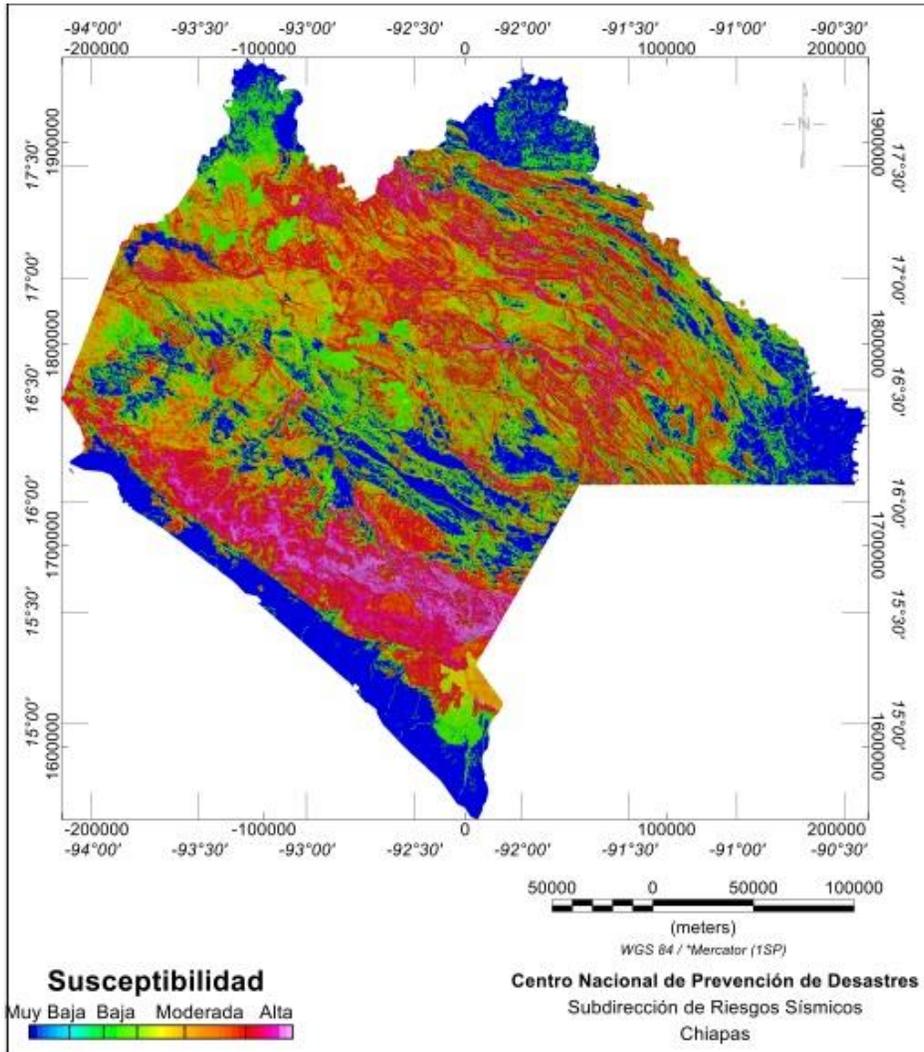


Figura 19. Método Mora – Vahrson para el estado de Chiapas.



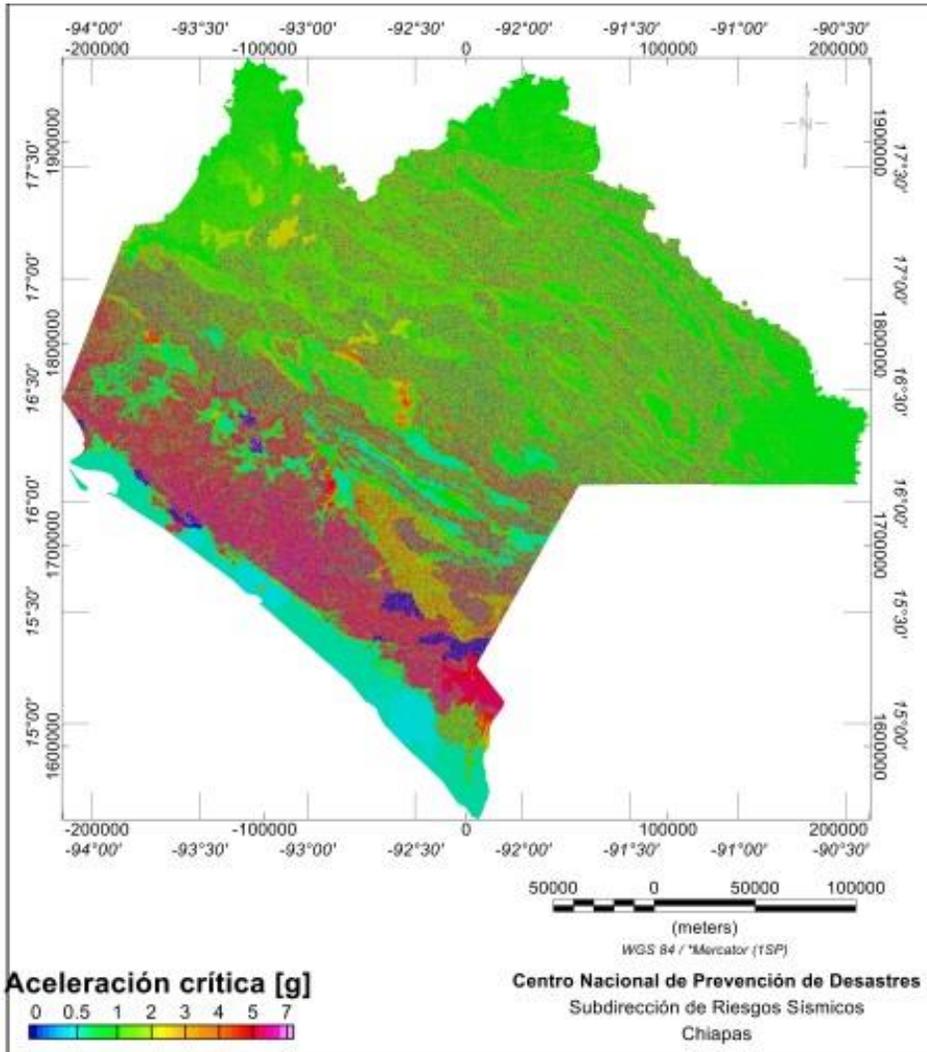


Figura 20. Aceleración crítica para el estado de Chiapas.





Puebla

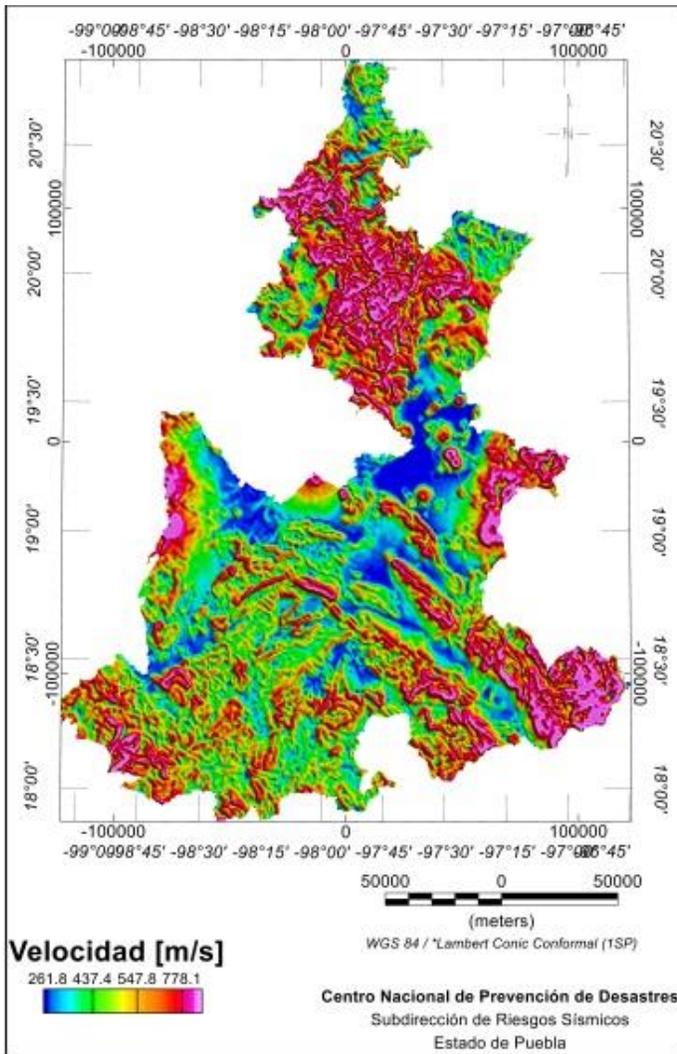


Figura 21. Mapa de Vs30 (USGS) del estado de Puebla.



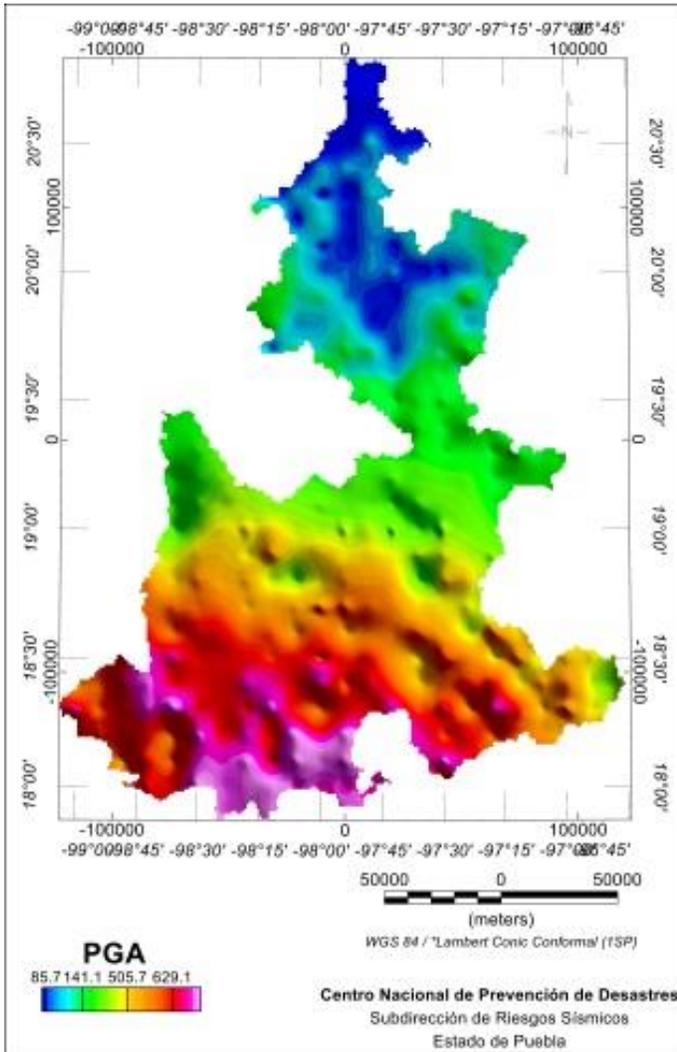


Figura 22. Mapa de PGA del estado de Puebla.



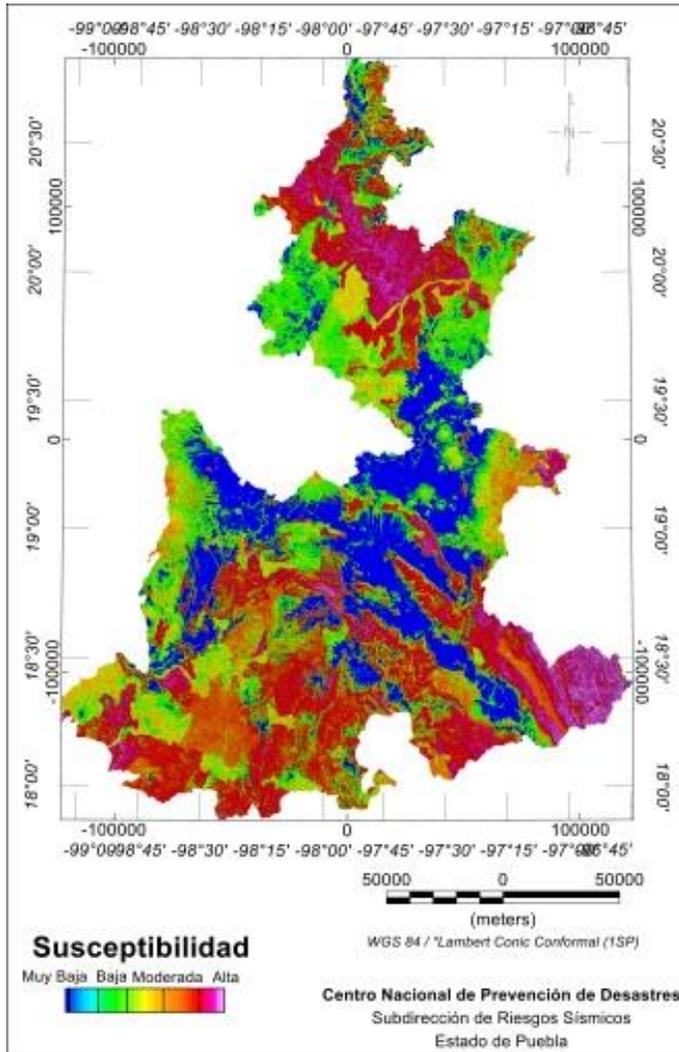


Figura 23. Método Mora – Vahrson para el estado de Puebla.



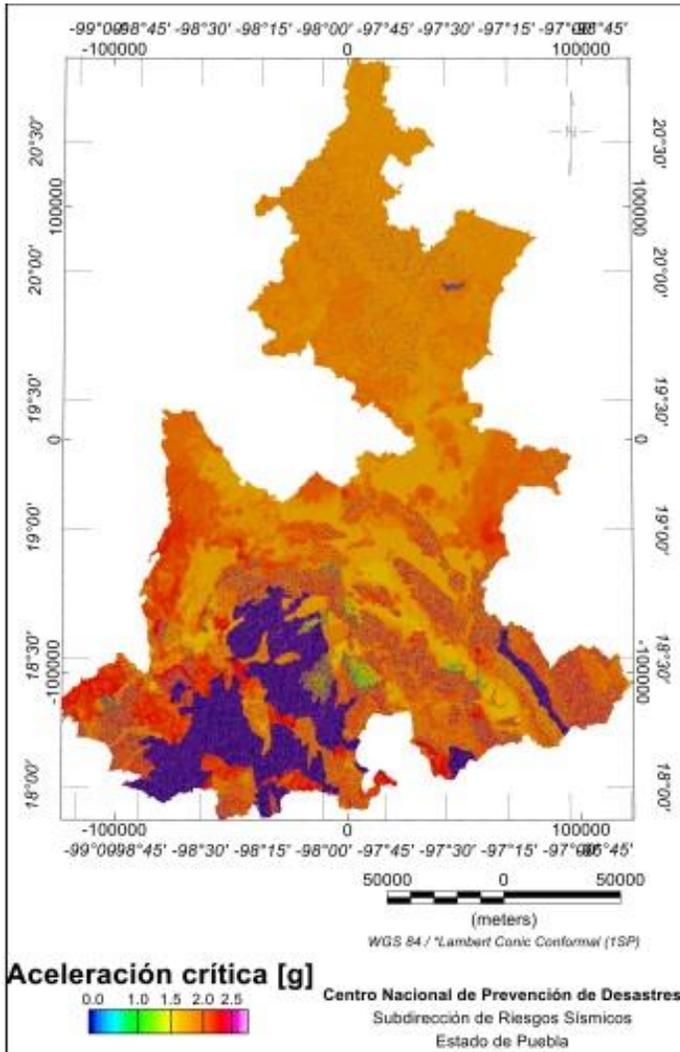


Figura 24. Aceleración crítica para el estado de Puebla.





Conclusiones

Algunos estados del país son muy susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos de gran magnitud y potencial destructivo porque presentan un relieve escarpado, litologías desfavorables y climas húmedos, como la costa sur de la República Mexicana (desde el estado de Chiapas hasta Guerrero), la costa del estado de Jalisco, los estados de Veracruz, Tabasco, Puebla, Hidalgo, Estado de México, Distrito Federal, Guanajuato, Baja California Norte y, en menor medida, algunas porciones de los estados de Sinaloa, San Luís Potosí, Durango, Zacatecas y Nuevo León.

Los mapas generados con esta técnica sirven como herramienta en la toma de decisiones respecto a las zonas de interés para la asignación de recursos y acciones concretas en la prevención, control y mitigación de deslizamientos.

Las regiones más susceptibles a deslizamientos se encuentran ubicadas en las partes altas de las microcuencas, principalmente en los cañones fluviales, donde la susceptibilidad es alta, como en el estado de Chiapas y zonas sierras de Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Jalisco, etc.

Recomendaciones

Es claro que entre mayor detalle en la resolución de los cálculos, mayor será determinar la ubicación de las zonas de mayor peligro de deslizamiento por sismo.

Con la información disponible y generada en este proyecto es posible tener estimaciones aproximadas que ayuden a identificar zonas de alto peligro para desarrollar estudios de campo específicos para recabar información más completa y por lo tanto realizar estudios más detallados.

Para mayor confiabilidad en los resultados, se recomienda una caracterización de los sitios con menor factor de seguridad, en la cual se determinen las condiciones geológicas e hidrológicas existentes, para determinar el grado de alteración de las rocas y la presión de poro.

Bibliografía consultada

- Cid Villegas, G, (2015). Tesis de maestría: Aplicación de sistemas de información geográfica en la documentación de fallas cuaternarias en México. Centro de Geociencias, UNAM, Juriquilla, Qro.
- García Acosta V. y Suarez Reynoso G (1996). Los sismos en la historia de México. Ediciones Científicas Universitarias. Universidad Nacional Autónoma de México. Tomo I, pág. 718.
- León Loya, 2014. Estado y clasificación de la microsismicidad en la parte central de la sierra madre oriental. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Quintanar, L., Rodríguez-González, M. y Campos-Enríquez, O. (2004). A shallow crustal earthquake doublet from the Trans-Mexican Volcanic Belt (Central Mexico). Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 3, pp 845-855.
- Mendoza, Avith, 2012. Estudio de la estabilidad del valor b para regiones sismotectónicas de México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Niño M., Jaimés M.A., Reinoso E. Seismic-event-based methodology to obtain earthquake-induced translational landslide regional hazard maps. Nat. Hazards. 2014;73:1697-1713
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in a formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude frequency for earthquakes, Geophys. Bull. Hokkaido Univ., 13, pp. 99-103.





SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC

COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

Utsu, T. (1966). A statistical significance test of the difference in b-value between two earthquake groups. *Journal of Physics of the Earth*, 14(2), 37-40.

- Utsu, T. (1992). On seismicity, in Report of the Joint Research Institute for Statistical Mathematics, Institute for Statistical Mathematics, Tokyo, pp. 139-157.
- Utsu, T. (1999). Representation and analysis of the earthquake size distribution: a historical review and some new approaches, *PAGEOP*, 155, 509-535.
- Zúñiga, F.R., Suárez, Figueroa, A., Mendoza, A., 2017. A first-order sismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *Journal of Seismology*.
- Zúñiga, F.R., Suárez, G., Ordaz, M. y García-Acosta, V., 1997. Proyecto: Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, proyecto 89-0190.

Páginas de internet consultadas

Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Servicio Sismológico Nacional: <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

Servicio Geológico de los Estados Unidos:

<https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): <https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150>

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México.
Tel: 52+55 5424 6100, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en
<https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>

Página 40 de 40



2020
AÑO DE
LEONA VICARIO
BENEMÉRITA MADRE DE LA PATRIA

